# INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Rapport final, projet CC04.1

Sous la direction de

Pascal Bernatchez, Ph.D.

Université du Québec à Rimouski





Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec (MTQ)

Avril 2019

#### AVERTISSEMENT

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports du Québec (MTQ), Direction de la coordination de la recherche et de l'innovation et a été financée par le Fonds vert dans le cadre de l'action 6.3 du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (PACC 2013-2020).

Le MTQ n'est pas responsable de l'exactitude, de l'actualité et de la fiabilité du contenu de ce rapport. Les points de vue exprimés dans ce rapport émanent des auteurs et ne coïncident pas nécessairement avec ceux du ministère des Transports du Québec.

### CHERCHEUR RESPONSABLE DU PROJET

Pascal Bernatchez, Ph. D.

Université du Québec à Rimouski Département de biologie, chimie et géographie Chaire de recherche en géoscience côtière Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) 300, allée des Ursulines, case postale 3300 Rimouski (Québec) G5L 3A1 Téléphone : (418) 723-1986, poste 1257 (bureau) ou poste 1206 (laboratoire) Télécopieur : (418) 724-1847 Courriel : pascal\_bernatchez@uqar.ca Site web : http://dgizc.uqar.ca

# CHARGÉ DE PROJET AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (MTQ)

Michel Michaud, géog., M. ATDR

Conseiller en recherche et chargé de projet en adaptation aux changements climatiques Direction de la coordination de la recherche et de l'innovation

Direction de la coordination de la recherche et de l'innovation Direction générale de la gestion des actifs routiers et de l'innovation Ministère des Transports du Québec 800, Place d'Youville, 15<sup>e</sup> étage Québec (Québec) G1R 3P4 Téléphone : 418 643-0800, poste 24161

Courriel : michel.michaud@transports.gouv.qc.ca

## COMITÉ DE SUIVI

#### Michel Michaud, géog. M ATDR, DCRI

Corina Nicorici, conseillère en recherche, géomorphologue, DCRI Annie Lévesque, répondante régionale en sécurité civile, DGCN Marie-Hélène Grenon, ing., DGCN Claudine Forget, biologiste, DGBGI Mathieu Leclerc, ing., DGBGI Yves Blanchard, géomorphologue-géographe B. Sc. , DGBGI Tristan Caron, géomorphologue-géographe B. Sc., DGBGI Louis Vigneau, chef retraité du CS Îles-de-la-Madeleine, DGBGI Rosaire-Gil Arseneau, chef du CS Îles-de-la-Madeleine, DGBGI Pascal Bernatchez, Ph. D., chercheur responsable, LDGIZC, UQAR Maude Corriveau, professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR

#### ÉQUIPE DE RECHERCHE

**Maude Corriveau**, M. Sc., professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR Analyse de l'état d'englacement et de l'érosion et rédaction

**Mélany Belzile**, M. Sc., professionnelle de recherche, Physique des océans > Laboratoire de Rimouski (POLR), ISMER *Modélisation, relations empiriques et rédaction* 

Simon Senneville, agent de recherche, Physique des océans > Laboratoire de Rimouski (POLR), ISMER Modélisation MOR-CICE-5

**Eliott Bismuth**, M. Sc. Océanographie, Auxiliaire de recherche, LDGIZC, UQAR.

*Traitement des données de vagues et validation du modèle de vagues WaveWatchIII, extraction des données de vagues sur la simulation réaliste* 

**Caroline Sevigny**, Ph. D., Océanographie physique, Auxiliaire de recherche, ISMER

Modélisation WaveWatch III

Marion Bandet, Ph. D. Ocean and Resources Engineering, Auxiliaire de recherche. (LDGIZC), UQAR.

Extraction des données de vagues WaveWatch III sur la simulation climatique

**Louis Cormier**, B. Sc., professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR Systèmes de suivi par caméras

# RÉFÉRENCE SUGGÉRÉE

CORRIVEAU, M., BERNATCHEZ, P., BELZILE, M. et SENNEVILLE, S. 2018, Influence de la réduction du couvert de glace sur l'érosion côtière en bordure des infrastructures routières de l'Est du Québec dans un contexte de changements climatiques (CC04.1) : Rapport final. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport final remis au ministère des Transports du Québec, avril 2019, 457 p. et annexes.

#### REMERCIEMENTS

L'équipe de recherche tient à remercier le ministère des Transport du Québec (MTQ) pour son soutien à la réalisation de ce projet de recherche et son financement par le Fonds vert.

L'équipe de recherche tient à remercier Michel Michaud pour la coordination et le suivi administratif du projet au MTQ.

Finalement, nous remercions James Caveen pour son support informatique indéfectible.

## SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

À partir de caméras de suivi, des séries temporelles des conditions d'englacement sur le haut et le bas estran ont été réalisées. Par la suite, des relations empiriques ont été développées et ont permis de produire les conditions d'englacement de l'estran pour 16 segments d'analyse pour la période 1981-2070, et ce, pour trois simulations climatiques différentes. L'analyse de ces données indique que l'englacement (durée de la saison glacielle et de l'état de la glace) sera à la baisse pour tous les sites d'études. On prévoit que la durée de la saison glacielle sur le haut estran subisse une diminution comprise entre 30 jours et 67 jours, ce qui équivaut à une baisse de l'ordre de 19 % à 58 % par rapport à la durée de 1981-2010. Sur le bas estran, on prévoit une diminution comprise entre 31 jours et 48 jours, soit entre 20 % et 64 % selon les sites d'étude. Les sites à l'écart des zones de production et d'accumulation de glace de mer sont les plus sensibles aux changements climatiques (Chandler et La Martinique et Pointe-aux-Loups aux Îles-de-la-Madeleine).

Une analyse sommaire des conditions de vagues pour la période 1981-2070 a été réalisée. Les vagues ont été produites à l'aide du modèle WaveWatch III pour la simulation climatique BBHI (la plus chaude des trois simulations). Pour tous les sites d'étude, à l'exception de La Martinique, le nombre d'heures où la hauteur significative des vagues en direction de la côte est supérieure au 95<sup>e</sup> percentile (calculé sur l'intervalle 1981-2010) est à la hausse (entre 21 % et 289 %).

Les conditions de vagues combinées aux conditions d'englacement pour l'intervalle 2000-2015 (simulation réaliste NARR-GEM) ont été mises en relation avec les mesures de déplacements négatifs mesurés à la côte. Ceci a permis d'estimer le rôle de protection contre l'érosion côtière assuré par la glace. Selon les conditions annuelles de vagues et d'englacement de l'estran, le ratio de protection a varié entre 0 % et 100 % selon les années et les sites. Théoriquement, s'il n'y avait pas eu de glace d'estran durant les années de suivi, le déplacement négatif moyen annuel aurait subi une hausse comprise entre 0 % à 53 % ou un recul supplémentaire compris entre 0 m et 0,78 m.

Sur les sites où les relations entre les déplacements négatifs mesurés à la côte et les conditions hydrodynamiques et d'englacement ont été concluantes, il a été possible d'estimer l'ampleur du changement de la vitesse de déplacement du littoral pour l'horizon 2041-2070. On prévoit que la valeur des déplacements négatifs moyens de 1981-2010 à 2041-2070 passe de 0,66 m à 0,70 m à Penouille 1-3 (+7 %), de 0,26 m à 0,38 m à La Martinique (+43 %), de 0,68 m à 1,65 m à Rivière-à-Claude (+144 %), de 0,12 m à 0,58 m

(+384 %) à Rivière Pentecôte et de 0,22 m à 1,38 m à Saint-Ulric (+516 %). L'impact de ces hausses varie en fonctions de la dynamique côtière et de l'évolution historique des sites d'étude. C'est sur les sites de Rivière-à-Claude et de Saint-Ulric que les changements prévus entraîneraient un changement d'évolution, passant d'une tendance à la stabilité relative à une tendance à l'érosion.

Les résultats du projet indiquent que la conception des ouvrages de protection et l'analyse des risques de submersion et d'érosion doivent tenir compte des changements aux conditions d'englacement d'estran et aux conditions de vagues attendues sous l'effet des conditions climatiques.

Dans ce cadre de ce projet, l'influence de la glace d'estran sur l'évolution côtière, à travers son rôle de protection, a pu faire l'objet d'analyses. Toutefois, les connaissances sur les relations entre la géomorphologie et la glace sont encore très peu développées, voire presque inexistantes. Cette limite a été soulevée à maintes reprises dans les conclusions ayant été émises sur les perspectives d'évolution côtière dans un contexte de changements climatiques. En ce sens, les projections d'évolution côtière nécessitent d'être améliorées grâce à l'acquisition de connaissances sur l'impact des conditions d'englacement sur la dérive sédimentaire et les échanges longitudinaux, sur les échanges sédimentaires transversaux, notamment sur les sites où l'on retrouve des réserves sédimentaires sur le bas estran (cordons, barres sableuses) et sur l'évolution des profils de plage et ce, d'autant plus que ces conditions changeront sous l'effet des changements climatiques.

# TABLES DES MATIÈRES

1. INTR	ODUCTION
11	CONTEXTE ET PROBLEMATIONE 31
1.2.	OBJECTIES DU PROJET
2. MET	HODOLOGIE
2.1.	ÉLEMENTS METHODOLOGIQUES RELATIFS AU PREMIER OBJECTIF SPECIFIQUE
2.1.1	. Production des séries temporelles de l'état d'englacement de l'estran à l'aide
	des images des caméras de suivis côtiers
2.1	1.1.1.    Saisons glacielles ayant été suivies : 2008 à 201542
2.1	1.1.2.   Regroupement des caméras   43
2.1.2	2. Élaboration des relations empiriques43
2.1.3	<i>État d'englacement de l'estran (niveau de développement du pied de glace . 46</i>
2.1.4	Tendances : passé récent (1981-2010) et horizon 2055 (2041-2070)
2.2.	ÉLEMENTS METHODOLOGIQUES RELATIFS AU DEUXIEME OBJECTIF SPECIFIQUE
2.2.1	. Vitesses de déplacement de la ligne de rivage/trait de côte
2.2.2	Conditions hydrodynamiques 2000-2015 (simulation réaliste)
2.2	2.2.2.         Niveau d'eau total à la côte (NETC)         53
2.2.3	Modèle théorique : indice de protection offert par la glace 2000-2015
	(simulation réaliste)
2.2	2.3.1. Indice de protection: contre l'érosion latérale par les agents hydrodynamiques 55
2.2	2.3.2. Indice de protection verticale sur le haut estran
2.2	2.3.3. Indice de protection générale sur le bas estran
2.2	2.3.4. Indice de protection
2.2.4	Relations entre l'état à englacement et la vitesse de deplacement au trait de
2.2	cote ou lighe de rivage
2.3.	ELEMENTS METHODOLOGIQUES SPECIFIQUES AU TROISIEME OBJECTIF SPECIFIQUE
2.4.	ELEMENTS METHODOLOGIQUES RELATIFS AU QUATRIEME OBJECTIF SPECIFIQUE
2.5. EI	LEMENTS METHODOLOGIQUES RELATIFS AUX MODELES ET AUX SIMULATIONS REALISTES ET
CL	
2.5.1	. Simulations realistes MOR-GEM et MOR-NARR/GEM (+ vents CFSR)
2.5.2	2. Simulations climatiques (AEV bTq, AHJ et BBHI)
2.5	5.2.1. Niveau d'eau obtenu à l'aide des simulations
2.5.4	Limites methodologiques liees a l'utilisation de modèle et de scendrios
3. LOCA	ALISATION DES SITES TEMOINS71

4.	RELATIO	NS EMPIRIQUES DEVELOPPEES POUR PRODUIRE LES SERIES TEMPOF CONDITIONS D'ENGLACEMENT POUR LA PERIODE 1981-2070	RELLES DE
4.1	. Lim	ITES DES EQUATIONS DES RELATIONS EMPIRIQUES	
5.	ÉVOLUTI	ION DES CONDITIONS D'ENGLACEMENT ENTRE PASSE RECENT ET L'H	ORIZON
2055	POUR TO	DUS LES SITES TEMOINS	88
5.1	. Сня	RONOLOGIE DE LA SAISON GLACIELLE POUR LE PASSE RECENT ET L'HORIZON 2055	
	5.1.1.	Haut estran	
	5.1.1.1	Haut estran : début de la saison glacielle	91
	5.1.1.2	. Haut estran : fin de la saison glacielle	94
1	5.1.2.	Bas estran	97
	5.1.2.1	. Bas estran : début de la saison glacielle	97
	5.1.2.2	Bas estran : fin de la saison glacielle	
5.2	. DUREE	DE LA SAISON GLACIELLE SUR LE HAUT ESTRAN ET LE BAS ESTRAN POUR LE PASSE RECI	ENT ET
	L'HORIZ	zon 2055	
1	5.2.1.	Haut estran : durée de la saison glacielle	
1	5.2.1.	Bas estran : durée de la saison glacielle	107
5.3	. <b>N</b> омв	BRE DE JOURS OU LA GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN ASSURE UNE PROTECTION CO	NTRE
	L'EROS	SION PAR LES AGENTS HYDRODYNAMIQUES POUR LE PASSE RECENT ET L'HORIZON 205	55111
6.1	. Nomb	POUR TOUS LES SITES TEMOINS	115 ST
6.2	HALITE	EUR SIGNIEICATIVE MAXIMALE ATTEINTE ANNI IELI EMENT DOLLA LE DASSE RECENT ET L	ттэ 'новізом
0.2	2055		127
7.	ANALYS	ES DETAILLEES PAR SITE TEMOINS	
7.1	. Sair	NT-ULRIC	
	7.1.1.	Description du segment d'analyse de Saint-Ulric	
	7.1.2.	Suivi par MTQ, Saint-Ulric	
;	7.1.3.	Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), Saint	-Ulric 139
	7.1.4.	Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de	e suivi avec
		les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, Saint-Ulric	
	7.1.5.	Évaluation des reculs négatifs pour l'horizon 2055	
;	7.1.6.	Dynamique d'évolution des terrasses de plage de Saint-Ulric	
;	7.1.7.	Rôle de la glace et perspectives d'évolution	
7.2	. Rivi	IERE-A-CLAUDE	
	7.2.1.	Description du segment d'analyse de Rivière-à-Claude	
	7.2.2.	Suivi par le MTQ, Rivière-à-Claude	
;	7.2.3.	Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), anse	de Rivière-
		à-Claude	

7.2.4	Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec
les do	onnées de niveau d'eau, de vagues et de glace, Rivière-à-Claude
7.2.5	Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison
de la	réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055, Rivière-à-Claude
7.2.6	Dynamique d'évolution des terrasses de plage de Rivière-à-Claude
7.2.7	Rôle de la glace et perspectives d'évolution
7.3.	PENOUILLE 1-3
7.3.1	Description du segment d'analyse de Penouille 1-3
7.3.2	Suivi par le MTQ, Penouille 1-3
7.3.3	Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), Penouille 1-3
734	Mise en relation des dénlacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec
7.5.4	les données de niveau d'eau de vagues et de alace. Penouille 1-3
735	Estimation du changement de la vitesse de dénlacement du couvert de glace
7.5.5	nour l'horizon 2055. Penouille 1-3
736	Dynamiaue d'évolution des terrasses de plage de Penouille 1-3 et influence de
7.5.0	la alace d'estran
737	Rôle de la alace et perspectives d'évolution 195
74	PENOLULIE 4-5 196
7.4.	Description du seament d'analyse de Penouille 4-5 196
7.4.1	Suivi nor le MTO Penouille 1-5
7.4.2	Dynamique, alacielle selon les observations (caméras de suivi). Penouille 4-5
100	<i>Dynamique graciene scion les observations (cumerus de survi), r enoune 4 5</i>
199 7 <i>1 1</i>	Mice en relation des déplacements négatifs mesurés quy stations de suivi ques
7.4.4	les données de niveau d'equi de vagues et de glace
715	Es données de niveau d'édu, de vugues et de gidee
7.4.5	de la réduction du couvert de alace pour l'horizon 2055
716	Dungmique d'évolution du litteral et influence de la glace d'estran sur
7.4.0	l'évolution câtière
7 4 7	Pâla de la alace et perspectives d'évolution
7.4.7	Cuantica and gluce et perspectives à evolution
7.5. 7.7 1	CHANDLER
7.5.1	Description du segment à analyse de Chanaler
7.5.2	Suivi par le Mi Q, Chanaler
7.5.3	Dynamiques glacienes seion les observations (cameras de suivi), Chandler .217
7.5.4	Nise en relation des deplacements negatifs mesures aux stations de suivi dvec
7 6 6	les aonnees de niveau à eau, de vagues et de glace, Chandler
1.5.5	Estimation au changement de la vitesse de aeplacement du littoral en raison
	ae la reauction au couvert ae glace pour l'horizon 2055
<i>1.5.6</i>	עקר אין
7.5.7	Kole ae la glace et perspectives d'evolution
/.b.	IVIARIA
7.6.1	Description du segment d'analyse de Maria
7.6.2	. Suivi par le MTQ, Maria

7.6.3.	Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi)	234
7.6.4.	Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de	e suivi avec
	les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, Maria	
7.6.5.	Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral e	en raison
	de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055, Maria	
7.6.6.	Dynamique d'évolution du littoral et influence de la glace d'estran s	ur
	l'évolution côtière	
7.6.7.	Rôle de la glace et perspectives d'évolution	
7.7. Po	INTE-VERTE	
7.7.1.	Description du segment d'analyse de Pointe-Verte	
7.7.2.	Suivi par le MTQ, Pointe-Verte	
7.7.3.	Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), Point	e-Verte
7.7.4.	Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de	e suivi avec
	les données de niveau d'eau de vagues et de glace, Pointe-Verte	
7.7.5.	Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral d	en raison
	de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055, Pointe-Vert	e 256
7.7.6.	Dynamique d'évolution du littoral	
7.7.7.	Rôle de la alace et perspectives d'évolution	
7.8. LA	Martinique	
7.8.1.	Description du segment d'analyse de La Martinique	
7.8.2.	Suivi par le MTQ, La Martinique	
7.8.3.	Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), La M	artinique 267
784	Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de	suivi avec
7.0.4.	les données de niveau d'eau de vagues et de alace. La Martinique	271
785	Estimation du changement de la vitesse dénlacement du littoral en	raison de
7.0.5.	la réduction du couvert de alace pour l'horizon 2055. La Martinique	275
796	Dynamique d'évolution du littoral de La Martinique	275
7.0.0.	Pôle de la alace et perspectives d'évolution	2//
7.0.7.		279
7.9. FU	Description du sagment d'angluse de Dointe aux Louns	201
7.9.1.	Suivi par la MTO Bointe aux Lours	201 207
7.9.2.	Suivi pui le IVI Q, Pointe-uux-Loups	
7.9.5.	Dynamique giuciene selon les observations (cumerus de suivi), Point	200
704	Loups	
7.9.4.	las doppées de niveru d'agu de viggues et de alase. Pointe aux lou	suivi uvec
705	Estimation du changement de la vitesse de déplacement du litteral	75 291
1.3.3.	de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055. Deinte au	
700	Dunamique d'évolution du littorel de Pointe aux Lours	204 Loups
7.9.D. 707	Dynamique a evolution au intordi de Pointe-dux-Loups	
7.9.7.		
7.10. PO	INIE-LEBEL	
7.10.1.	Description au segment à analyse de Pointe-Lebel	

7.10.2	Suivi par le MTQ, Pointe-Lebel
7.10.3	Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), Pointe-Lebel305
7.10.4	Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec
	les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, Pointe-Lebel
7.10.5	Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison
	de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055
7.10.6	Dynamique d'évolution des falaises de Pointe-Lebel
7.10.7	Rôle de la glace et perspectives d'évolution
7.11. E	AIE-SAINT-LUDGER
7.11.1	Description du segment d'analyse de Baie-Saint-Ludger
7.11.2	Suivi par le MTQ, Baie-Saint-Ludger
7.11.3	Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), Baie-Saint-
	Ludger
7.11.4	Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec
	les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, Baie-Saint-Ludger322
7.11.5	Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison
	de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055
7.11.6	Dynamique d'évolution des falaises de Baie-Saint-Ludger
7.11.7	Rôle de la glace et perspectives d'évolution
7.12. F	IVIERE PENTECOTE
7.12.1	Description du segment d'analyse de Rivière Pentecôte
7.12.2	Suivi MTQ, Rivière Pentecôte
7.12.3	Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), Rivière
	Pentecôte
7.12.4	Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec
	les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, Rivière Pentecôte341
7.12.5	Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison
	de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055, Rivière Pentecôte . 345
7.12.6	Dynamique d'évolution du littoral de Rivière Pentecôte
7.12.7	Rôle de la glace et perspectives d'évolution
7.13. F	IVIERE-SAINT-JEAN
7.13.1	Description du segment d'analyse de Rivière Saint-Jean
7.13.2	Suivi par le MTQ, Rivière Saint-Jean
7.13.3	Dynamiques glacielles selon les observations (caméras de suivi), Rivière Saint-
	Jean
7.13.4	Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec
	les données de niveau de niveau d'eau, de vagues et de glace, Rivière Saint-
	Jean
7.13.5	Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison
	de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055, Rivière-Saint-Jean 367
7.13.6	Dynamique d'évolution des falaises de Rivière Saint-jean et influence de la
	glace d'estran
7.13.7	Rôle de la glace et perspectives d'évolution

7.14.	Long	UE-POINTE-DE-MINGAN	374
7.14	4.1.	Description des segments d'analyse de Longue-Pointe-de-Mingan	374
7	.14.1.1	Longue-Pointe-de-Mingan, D	
7	.14.1.2.	Longue-Pointe-de-Mingan, B_ouest	383
7	.14.1.3	Longue-Pointe-de-Mingan, B_Est	385
7.14	4.2.	Suivi par le MTQ, Longue-Pointe-de-Mingan	386
7.14	4.3.	Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), Longue-H de-Mingan	Pointe- 387
7.14	4.4.	Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de sui	ivi avec
		les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, Longue-Pointe-de-N	Mingan 400
7.14	4.5.	Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en r	aison
		de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055, Longue-Pointe-	-de-
		Mingan	407
7.14	4.6.	Dynamique d'évolution du littoral de Longue-Pointe-de-Mingan	407
7.14	4.7.	Rôle de la glace et perspectives d'évolution	412
B. CAF	RACTER	RISTIQUES ENVIRONNEMENTALES INFLUENCANT LA SENSIBILITE DE LA	GLACE
		DE HAUT ET DE BAS ESTRAN AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES	427
8.1.	DIMIN	UTION SEVERE DE LA DUREE DE LA SAISON GLACIELLE SUR LE HAUT ESTRAN	430
8.2.	DIMIN	UTION SEVERE DE LA DUREE DE LA SAISON GLACIELLE SUR LE BAS ESTRAN	435
8.3.	DIMIN	UTION MODEREE DE LA DUREE DE LA SAISON GLACIELLE SUR LE HAUT ESTRAN	436
8.4.	DIMIN	IUTION MODEREE DE LA DUREE DE LA SAISON GLACIELLE SUR LE BAS ESTRAN	441
). CAI	RTOGR	APHIE DES SECTEURS EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES	5 OU
	I	LES VITESSES D'EROSION DES LITTORAUX DEVRAIENT AUGMENTER	442
10. COI	NCLUSI	ONS PAR OBJECTIF	443
10.1.	Conc	LUSIONS OBJECTIF 1	443
10.2.	Conc	LUSIONS OBJECTIF 2	444
10.3.	CONC	LUSIONS OBJECTIF 3	444
10.4.	Conc	LUSIONS OBJECTIF 4	446
10.5.	Солс	LUSIONS GENERALES	447
RÉFÉREN	CES		450
ANNEXES	5.		458
Annexe A	: Année	s d'observation photographiques disponibles pour construire les relations empi	iriques
Annous P		unament des saméres	
Annexe B	: Regrou	upement des cameras	462
Annexe C	: coorde	onnées geographiques retenues pour le choix des cellules du modèle MOR pour	
	ovtrain	a los variables environnementales et identifications desdites collulas	165
Anneve D	extrair	e les variables environnementales et identifications desdites cellules	465
Annexe D Annexe F	extrair : Zone c : Mesur	e les variables environnementales et identifications desdites cellules le formation « régulière » du pied de glace de haut estran es de déplacement du trait de côte/ligne de rivage	465 467 477
Annexe D Annexe E Annexe F	extrair : Zone c : Mesur : Cartes	e les variables environnementales et identifications desdites cellules de formation « régulière » du pied de glace de haut estran es de déplacement du trait de côte/ligne de rivage des points de vagues	465 467 477 479

Annexe G : Script pour appliquer les relations empiriques sur des sorties de simulation climatiques	
	0
Annexe H : Tableau des coefficients de détermination (R <sup>2</sup> ) des observations et des résultats des relations	S
empiriques	2
Annexe I : Conditions d'englacement pour le passé récent et l'horizon 2055	5
Annexe J : Conditions de vagues pour le passé récent et l'horizon 2055	4
Annexe K : Tableau détaillé des données des marégraphes les plus près des sites témoin60	1
Annexe L : Formule pour extraire automatiquement l'orientation de la côte à partir du tracé d'une ligne	
dans ArcGIS61	.1
Annexe M : Conditions de vagues observées à Penouille 1-3 et Penouille 4-561	3

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. ORGANIGRAMME METHODOLOGIQUE POUR L'ATTEINTE DE L'OBJECTIF 1	37
FIGURE 2. CAMERAS DE SUIVIS COTIERS	88
FIGURE 3. LIMITES GEOMORPHOLOGIQUES OBSERVEES POUR UNE COTE BASSE VEGETALISEE (EXEMPLE DE SAINT-	
Ulric)	39
FIGURE 4. COUVERTURE TEMPORELLE DES CAMERAS DE SUIVI, LES SERIES EN GRIS N'ONT PAS ETE RETENUES AU	
FINAL POUR LE DEVELOPPEMENT DES RELATIONS EMPIRIQUES4	1
FIGURE 5. CONCENTRATION TOTALE HEBDOMADAIRE (%) DE GLACE DE MER DANS L'ESTUAIRE ET LE GOLFE DU	
SAINT-LAURENT POUR LES ANNEES DE SUIVIS PAR CAMERAS	12
FIGURE 6. EXEMPLE DE VARIABLES ENVIRONNEMENTALES UTILISEES DANS LA CREATION DES RELATIONS	
EMPIRIQUES DE BAIE-SAINT-LUDGER ACCOMPAGNEES DU SIGNAL DE DEVELOPPEMENT VERTICAL DE BAS	
ESTRAN A REPRODUIRE. (A) INDICE DE DEVELOPPEMENT VERTICAL TIRE DES PHOTOGRAPHIES, (B) EPAISSEUI	R
DE GLACE DE MER, (C) CONCENTRATION DE GLACE DE MER, (D) DEGRES-HEURE DE GEL ET (E) DEGRES-HEUR	RE
DE DEGEL	15
FIGURE 7. DIVISION DU HAUT ESTRAN POUR LA CONVERSION DES DONNEES DE CONCENTRATION ET D'EPAISSEUR	
DE GLACE EN INDICES DE PROTECTION (SUR LE SCHEMA, LA ZONE NORMALE DE FORMATION DU PIED DE	
GLACE DE HAUT ESTRAN EST DE 50 %)	17
FIGURE 8. ORGANIGRAMME METHODOLOGIQUE POUR L'ATTEINTE DE L'OBJECTIF 2	50
FIGURE 9. SCHEMA DES COMPOSANTES NECESSAIRES POUR LE CALCUL DU NIVEAU D'EAU TOTAL A LA COTE 5	53
Figure 10. Localisation de la limite $D_{_{MIN}}$ le long d'un profil de plage avec terrasse de plage en	
EROSION	6
FIGURE 11. PROTECTION DE LA COTE GRACE AU REHAUSSEMENT TOPOGRAPHIQUE PAR LA GLACE : PROFIL DU PIEL	D
DE GLACE DE HAUT ESTRAN, A PROXIMITE DU KM-REPERE 4,40, LORS DES LEVES DE DECEMBRE 2013 ET DE	Ξ
Mars 2014, Longue-Pointe-de-Mingan5	57
FIGURE 12. REGIME DE CONTACTS ET IMPACTS MORPHOLOGIQUES DU NETC SUR LE LITTORAL	52
FIGURE 13. ORGANIGRAMME METHODOLOGIQUE POUR L'ATTEINTE DE L'OBJECTIF 3	53
FIGURE 14. DOMAINE DU SIMULATEUR MOR	55
FIGURE 15. LOCALISATION DES SITES TEMOINS A L'ECHELLE DE L'ESTUAIRE ET DU GOLFE DU SAINT-LAURENT 7	2'2
FIGURE 16. SERIE TEMPORELLE (2009-2015) DU DEVELOPPEMENT VERTICAL DU PIED DE GLACE DE BAS ESTRAN	
DE BAIE-SAINT-LUDGER. LES OBSERVATIONS SONT EN NOIR ET LE RESULTAT DE LA RELATION EMPIRIQUE ES	т
EN MAGENTA7	<b>'</b> 4
FIGURE 17. SERIE TEMPORELLE ZOOMEE (2012-2013) DU DEVELOPPEMENT VERTICAL DU PIED DE GLACE DE BAS	5
ESTRAN DE BAIE-SAINT-LUDGER. LES OBSERVATIONS SONT EN NOIR ET LE RESULTAT DE LA RELATION	
EMPIRIQUE EST EN MAGENTA7	<b>'</b> 4
FIGURE 18. CHRONOLOGIE DE LA SAISON GLACIELLE SUR LE HAUT ESTRAN POUR LE PASSE RECENT ET POUR	
L'HORIZON 2055	39
FIGURE 19. CHRONOLOGIE DE LA SAISON GLACIELLE SUR LE BAS ESTRAN POUR LE PASSE RECENT ET POUR	
L'HORIZON 2055	90
FIGURE 20. DATE MOYENNE DU DEBUT DE LA SAISON GLACIELLE POUR LE PASSE RECENT ET L'HORIZON 2055,	
HAUT ESTRAN	)2
FIGURE 21. NOMBRE DE JOURS DE RETARD DU DEBUT DE LA SAISON GLACIELLE PREVUS POUR L'HORIZON 2055	
PAR RAPPORT AU PASSE RECENT, HAUT ESTRAN9	93

FIGURE 22. DATE MOYENNE DE LA FIN DE LA SAISON GLACIELLE POUR LE PASSE RECENT ET L'HORIZON 2055, HAUT
ESTRAN
FIGURE 23. NOMBRE DE JOURS D'AVANCE DE LA FIN DE LA SAISON GLACIELLE PREVUS POUR L'HORIZON 2055 PAR
RAPPORT AU PASSE RECENT, HAUT ESTRAN96
FIGURE 24. DATE MOYENNE DU DEBUT DE LA SAISON GLACIELLE POUR LE PASSE RECENT ET L'HORIZON 2055, BAS
ESTRAN
FIGURE 25. NOMBRE DE JOURS DE RETARD DU DEBUT DE LA SAISON GLACIELLE PREVUS POUR L'HORIZON 2055
PAR RAPPORT AU PASSE RECENT, BAS ESTRAN
FIGURE 26. DATE MOYENNE DE LA FIN DE LA SAISON GLACIELLE POUR LE PASSE RECENT ET L'HORIZON 2055, BAS
ESTRAN
FIGURE 27. NOMBRE DE JOURS D'AVANCE DE LA FIN DE LA SAISON GLACIELLE PREVUS POUR L'HORIZON 2055 PAR
RAPPORT AU PASSE RECENT, BAS ESTRAN
FIGURE 28. ÉVOLUTION DE DUREE DE LA SAISON GLACIELLE SUR LE HAUT ESTRAN (NOMBRE DE JOURS) POUR LE
PASSE RECENT ET L'HORIZON 2055
FIGURE 29. DIMINUTION EN NOMBRE DE JOURS ET VITESSES DE LA DIMINUTION EN JOUR/AN DE LA DUREE DE LA
SAISON GLACIELLE PREVUS POUR L'HORIZON 2055 PAR RAPPORT AU PASSE RECENT, HAUT ESTRAN 105
FIGURE 30. ÉVOLUTION (%) DE LA DIMINUTION DE LA DUREE DE LA SAISON GLACIELLE SUR LE HAUT ESTRAN ENTRE
LE PASSE RECENT ET L'HORIZON 2055
FIGURE 31. ÉVOLUTION DE DUREE DE LA SAISON GLACIELLE SUR LE BAS ESTRAN (NOMBRE DE JOURS) POUR LE
PASSE RECENT ET L'HORIZON 2055
FIGURE 32 DIMINUTION EN NOMBRE DE IQURS ET VITESSES DE LA DIMINUTION EN IQUR/AN DE LA DUREE DE LA
SAISON GLACIELLE PREVILS POLIR L'HORIZON 2055 PAR RAPPORT ALL PASSE RECENT. BAS ESTRAN 109
FIGURE 33 ÉVOLUTION EN DOURCENTAGE DE LA DIMINUTION DE LA DUREE DE LA SAISON GLACIELLE SUR LE BAS
ESTRAN ENTRE LE DASSE RECENT ET L'HORIZON 2055
FIGURE 31 ÉVOLUTION DU NOMBRE DE IQURS QUI LA GUACE DE HAUT ET DE RAS ESTRAN ASSURE UNE PROTECTION
CONTRE L'EDOCION DAD LES ACENTS LIVEDODVNAMIOLIES DOUD LE DASSE DECENT ET L'UODIZON 2055 112
CONTREL EROSION PAR LES AGENTS HTDRODTNAMIQUES POUR LE PASSE RECENT ET L'HORIZON ZOSS112
FIGURE SS. DIMINUTION EN NOMBRE DE JOURS ET VITESSES DE LA DIMINUTION EN JOUR/AN DU NOMBRE DE
JOURS OU LA GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN ASSURE UNE PROTECTION CONTRE L'EROSION PAR LES
AGENTS HYDRODYNAMIQUES PREVUE POUR L'HORIZON 2055 PAR RAPPORT AU PASSE RECENT, BAS ESTRAN
FIGURE 36. EVOLUTION EN POURCENTAGE DU NOMBRE DE JOURS OU LA GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN
ASSURE UNE PROTECTION CONTRE L'EROSION PAR LES AGENTS HYDRODYNAMIQUES ENTRE LE PASSE RECENT
ET L'HORIZON 2055
FIGURE 37. NOMBRE D'HEURES MOYEN ANNUEL OU LA HAUTEUR SIGNIFICATIVE DES VAGUES (HS) EST
SUPERIEURE AU 95E PERCENTILE (CALCULE SUR LE PASSE RECENT) POUR LE PASSE RECENT ET L'HORIZON
2055 POUR LES VAGUES EN DIRECTION DE LA COTE DURANT L'ANNEE
FIGURE 38. NOMBRE D'HEURES MOYEN ANNUEL DE DIFFERENCE (DELTA) OU LA HAUTEUR SIGNIFICATIVE DES
vagues (Hs) est superieure au 95e percentile (calcule sur le passe recent) entre le passe recent
ET L'HORIZON 2055 POUR LES VAGUES EN DIRECTION DE LA COTE DURANT L'ANNEE
FIGURE 39. ÉVOLUTION EN POURCENTAGE DU NOMBRE D'HEURES MOYEN ANNUEL OU LA HAUTEUR SIGNIFICATIVE
des vagues (Hs) est superieure au 95e percentile (calcule sur le passe recent) entre le passe
RECENT ET L'HORIZON 2055 POUR LES VAGUES EN DIRECTION DE LA COTE DURANT L'ANNEE

FIGURE 40. NOMBRE D'HEURES MOYEN ANNUEL OU LA HAUTEUR SIGNIFICATIVE DES VAGUES (HS) EST
SUPERIEURE AU 95E PERCENTILE (CALCULE SUR LE PASSE RECENT) POUR LE PASSE RECENT ET L'HORIZON
2055 POUR LES VAGUES EN DIRECTION DE LA COTE EN HIVER (DJF)
FIGURE 41. NOMBRE D'HEURES MOYEN ANNUEL DE DIFFERENCE (DELTA) OU LA HAUTEUR SIGNIFICATIVE DES
vagues (Hs) est superieure au 95e percentile (calcule sur le passe recent) entre le passe recent
ET L'HORIZON 2055 POUR LES VAGUES EN DIRECTION DE LA COTE EN HIVER (DJF)
FIGURE 42. NOMBRE D'HEURES MOYEN ANNUEL OU LA HAUTEUR SIGNIFICATIVE DES VAGUES (HS) EST
SUPERIEURE AU 95E PERCENTILE (CALCULE SUR LE PASSE RECENT) POUR LE PASSE RECENT ET L'HORIZON
2055 POUR LES VAGUES EN DIRECTION DE LA COTE AU PRINTEMPS (MAM)
FIGURE 43. NOMBRE D'HEURES MOYEN ANNUEL DE DIFFERENCE (DELTA) OU LA HAUTEUR SIGNIFICATIVE DES
vagues (Hs) est superieure au 95e percentile (calcule sur le passe recent) entre le passe recent
ET L'HORIZON 2055 POUR LES VAGUES EN DIRECTION DE LA COTE AU PRINTEMPS (MAM)
Figure 44. Nombre d'heures moyen annuel ou la hauteur significative des vagues (Hs) est
SUPERIEURE AU 95E PERCENTILE (CALCULE SUR LE PASSE RECENT) POUR LE PASSE RECENT ET L'HORIZON
2055 POUR LES VAGUES EN DIRECTION DE LA COTE EN ETE (JJA)
FIGURE 45. NOMBRE D'HEURES MOYEN ANNUEL DE DIFFERENCE (DELTA) OU LA HAUTEUR SIGNIFICATIVE DES
vagues (Hs) est superieure au 95e percentile (calcule sur le passe recent) entre le passe recent
ET L'HORIZON 2055 POUR LES VAGUES EN DIRECTION DE LA COTE EN ETE (JJA)
Figure 46. Nombre d'heures moyen annuel ou la hauteur significative des vagues (Hs) est
SUPERIEURE AU 95E PERCENTILE (CALCULE SUR LE PASSE RECENT) POUR LE PASSE RECENT ET L'HORIZON
2055 POUR LES VAGUES EN DIRECTION DE LA COTE EN AUTOMNE (SON)
Figure 47. Nombre d'heures moyen annuel de difference (delta) ou la hauteur significative des
vagues (Hs) est superieure au 95e percentile (calcule sur le passe recent) entre le passe recent
ET L'HORIZON 2055 POUR LES VAGUES EN DIRECTION DE LA COTE EN AUTOMNE (SON)
FIGURE 48. MOYENNES DES HAUTEURS SIGNIFICATIVES MAXIMALES ATTEINTES ANNUELLEMENT POUR LE PASSE
RECENT ET L'HORIZON 2055 POUR LES VAGUES EN DIRECTION DE LA COTE
FIGURE 49. DIFERENCES ENTRE LES MOYENNES DES HAUTEURS SIGNIFICATIVES MAXIMALES ATTEINTES
ANNUELLEMENT POUR LE PASSE RECENT ET L'HORIZON 2055 POUR LES VAGUES EN DIRECTION DE LA COTE
FIGURE 50. ÉVOLUTION EN POURCENTAGE DES MOYENNES DES HAUTEURS SIGNIFICATIVES MAXIMALES ATTEINTES
ANNUELLEMENT POUR LE PASSE RECENT ET L'HORIZON 2055 POUR LES VAGUES EN DIRECTION DE LA COTE
FIGURE 51. CELLULE HYDROSEDIMENTAIRE DE LA TARTIGOU
FIGURE 52. DELIMITATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE SAINT-ULRIC
FIGURE 53. PRISE DE VUE A LA CAMERA SAINT-ULRIC EST ET OUEST
FIGURE 54. PRISE DE VUE A LA CAMERA SAINT-ULRIC GLACE
FIGURE 55. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DES CAMERAS DE SAINT-
Ulric, releve photographique heliporte de septembre 2010
FIGURE 56. PRISE DE VUE D'UNE PORTION DU SITE SUIVI PAR LE MTQ D0202 SUR LE SEGMENT D'ANALYSE DE
SAINT-ULRIC, RELEVE PHOTOGRAPHIQUE HELIPORTE DE SEPTEMBRE 2010
Figure 57. Vue generale du segment d'analyse de Saint-Ulric, releve photographique heliporte de
SEPTEMBRE 2010

Figure 58. Englacement a maree basse sur le bas estran et haut estran et haut estran
ESSENTIELLEMENT LIBRE DE GLACE (1) SUIVI PAR LE DEGLACEMENT A MAREE HAUTE (2) LASSANT PLACE A
UNE PLATE-FORME ESSENTIELLEMENT LIBRE DE GLACE (LA NEIGE BLANCHIT LA PLATE-FORME ET LE HAUT
ESTRAN : IL N'Y A PAS DE GLACE OU ALORS TRES PEU) SUR LE SITE DE SAINT-ULRIC
FIGURE 59. EMPILEMENT DE GLACE A LA LIMITE INFERIEURE DE LA PLATE-FORME, 9 FEVRIER 2012, SAINT-ULRIC
FIGURE 60. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA
GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, SAINT-ULRIC143
FIGURE 61. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES
hydrodynamiques de Saint-Ulric
FIGURE 62. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES
HYDRODYNAMIQUES DE SAINT-ULRIC, SANS LES VALEURS EXTREMES
FIGURE 63. ÉVOLUTION DU NETC ET DE L'EROSION ENTRE LE PASSE RECENT ET L'HORIZON 2055, SAINT-ULRIC
FIGURE 64. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES
DES DEPLACEMENTS NEGATIFS MESUREES A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI ET SIMULEES, SAINT-ULRIC 152
FIGURE 65. CELLULE HYDROSEDIMENTAIRE DE RIVIERE-A-CLAUDE
FIGURE 66. DELIMITATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE RIVIERE-A-CLAUDE
FIGURE 67. PRISE DE VUE A LA CAMERA A RIVIERE-A-CLAUDE HYDRO
FIGURE 68. BAS ESTRAN DECOUVERT A MAREE BASSE
FIGURE 69. CONDITIONS DE VAGUES POUVANT ETRE OBSERVEES ASSEZ FREQUEMMENT DANS L'ANSE DE RIVIERE-
A-CLAUDE
FIGURE 70. ACCUMULATION DE SEDIMENTS EN SURFACE DU PIED DE GLACE DE HAUT ESTRAN, 13 MARS 2013,
ANSE DE RIVIERE-A-CLAUDE
FIGURE 71. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA
GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, RIVIERE-A-CLAUDE
FIGURE 72. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES
hydrodynamiques de Riviere-a-Claude
FIGURE 73. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES
hydrodynamiques de Riviere-a-Claude, sans les valeurs les extremes
FIGURE 74. ÉVOLUTION DU NETC ET DE L'EROSION ENTRE LE PASSE RECENT ET L'HORIZON 2055, RIVIERE-A-
CLAUDE
FIGURE 75. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES
DES DEPLACEMENTS NEGATIFS MESUREES A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI ET SIMULEES, RIVIERE-A-CLAUDE
FIGURE 76. CELLULE HYDROSEDIMENTAIRE DE PENOUILLE (1/2)
FIGURE 77. CELLULE HYDROSEDIMENTAIRE DE PENOUILLE (2/2)
FIGURE 78. DELIMITATION DES SEGMENTS D'ANALYSE DE PENOUILLE
FIGURE 79. PRISE DE VUE A LA CAMERA PENOUILLE 1
FIGURE 80. PRISE DE VUE A LA CAMERA PENOUILLE 3
FIGURE 81. ACCUMULATION DE COUCHE DE GLACE SUR LE HAUT ESTRAN PAR LA MAREE ET DEPOT DE RADEAU DE
GLACE DE MER FORMEE SUR LES EAUX COTIERES, 5 FEVRIER 2011, PENOUILLE 1-3

Figure 82. Frasil dans les eaux cotieres et s'accumulant sur le haut estran, 19 fevrier 2011,
Penouille 1-3
FIGURE 83. RARE EVENEMENT D'INTEGRATION DE SEDIMENT AU PIED DE GLACE PAR LES VAGUES, 13 MARS 2013,
Penouille 1-3
FIGURE 84. CONGERES SUR LE HAUT ESTRAN, 22 JANVIER 2011, PENOUILLE 1-3
FIGURE 85. DEGLACEMENT DE LA PORTION SUPERIEURE DU HAUT ESTRAN PAR LES VAGUES LE 2 AVRIL 2013,
PHENOMENE PEU FREQUENT SUR LE SITE DE PENOUILLE 1-3
FIGURE 86. OUVERTURE D'UN CORRIDOR D'EAU LIBRE SUR LE HAUT ESTRAN OU CIRCULE DE LA GLACE MORCELEE,
14 FEVRIER 2011, PENOUILLE 1-3
FIGURE 87. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA
GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, PENOUILLE 1-3187
FIGURE 88. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES
hydrodynamiques de Penouille 1 et 3
FIGURE 89. ÉVOLUTION DU NETC ET DE L'EROSION ENTRE LE PASSE RECENT ET L'HORIZON 2055, PENOUILLE 1-3
FIGURE 90. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES
DES DEPLACEMENTS NEGATIFS MESUREES A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI ET SIMULEES, PENOUILLE 1-3
FIGURE 91. PRISE DE VUE A LA CAMERA DE PENOUILLE 4
FIGURE 92. PRISE DE VUE A LA CAMERA PENOUILLE 5
FIGURE 93. MAREE BASSE DECOUVRANT LE BAS ESTRAN, 13 JUILLET 2010, PENOUILLE 4-5
FIGURE 94. DEGLACEMENT DE L'ESTRAN S'EFFECTUANT PERPENDICULAIREMENT A LA COTE, 24 MARS 2010,
FIGURE 94. DEGLACEMENT DE L'ESTRAN S'EFFECTUANT PERPENDICULAIREMENT A LA COTE, 24 MARS 2010, PENOUILLE 4-5
Figure 94. Deglacement de l'estran s'effectuant perpendiculairement a la cote, 24 mars 2010,         Penouille 4-5       201         Figure 95. Saison glacielle, etat d'englacement et niveau de protection verticale assuree par la
FIGURE 94. DEGLACEMENT DE L'ESTRAN S'EFFECTUANT PERPENDICULAIREMENT A LA COTE, 24 MARS 2010, PENOUILLE 4-5
Figure 94. Deglacement de l'estran s'effectuant perpendiculairement a la cote, 24 mars 2010,         Penouille 4-5       201         Figure 95. Saison glacielle, etat d'englacement et niveau de protection verticale assuree par la         glace de haut et de bas estran, Penouille 4-5       202         Figure 96. Relations entre les deplacements negatifs moyens annuels et les parametres
Figure 94. Deglacement de l'estran s'effectuant perpendiculairement a la cote, 24 mars 2010,       201         Figure 95. Saison glacielle, etat d'englacement et niveau de protection verticale assuree par la       201         Glace de haut et de bas estran, Penouille 4-5
Figure 94. Deglacement de l'estran s'effectuant perpendiculairement a la cote, 24 mars 2010,         Penouille 4-5       201         Figure 95. Saison glacielle, etat d'englacement et niveau de protection verticale assuree par la       202         Glace de haut et de bas estran, Penouille 4-5       202         Figure 96. Relations entre les deplacements negatifs moyens annuels et les parametres       204         Figure 97. Relations entre les deplacements negatifs moyens annuels et les parametres       204
FIGURE 94. DEGLACEMENT DE L'ESTRAN S'EFFECTUANT PERPENDICULAIREMENT A LA COTE, 24 MARS 2010,       201         FIGURE 95. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA       201         GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, PENOUILLE 4-5
Figure 94. Deglacement de l'estran s'effectuant perpendiculairement a la cote, 24 mars 2010,       201         Figure 95. Saison glacielle, etat d'englacement et niveau de protection verticale assuree par la       201         Glace de haut et de bas estran, Penouille 4-5
<ul> <li>FIGURE 94. DEGLACEMENT DE L'ESTRAN S'EFFECTUANT PERPENDICULAIREMENT A LA COTE, 24 MARS 2010, PENOUILLE 4-5</li></ul>
FIGURE 94. DEGLACEMENT DE L'ESTRAN S'EFFECTUANT PERPENDICULAIREMENT A LA COTE, 24 MARS 2010,       201         FIGURE 95. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA       201         GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, PENOUILLE 4-5
FIGURE 94. DEGLACEMENT DE L'ESTRAN S'EFFECTUANT PERPENDICULAIREMENT A LA COTE, 24 MARS 2010,       201         FIGURE 95. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA       201         GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, PENOUILLE 4-5       202         FIGURE 96. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       204         FIGURE 97. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       204         FIGURE 97. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       205         FIGURE 98. VITESSE DE PENOUILLE 4 ET 5, SANS LES VALEURS LES EXTREMES.       205         FIGURE 98. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES       205         FIGURE 99. UNITE HYDROSEDIMENTAIRE DE PABOS.       207         FIGURE 99. UNITE HYDROSEDIMENTAIRE DE PABOS.       211
FIGURE 94. DEGLACEMENT DE L'ESTRAN S'EFFECTUANT PERPENDICULAIREMENT A LA COTE, 24 MARS 2010,       201         FIGURE 95. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA       201         GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, PENOUILLE 4-5
FIGURE 94. DEGLACEMENT DE L'ESTRAN S'EFFECTUANT PERPENDICULAIREMENT A LA COTE, 24 MARS 2010,       201         FIGURE 95. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA       201         GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, PENOUILLE 4-5
FIGURE 94. DEGLACEMENT DE L'ESTRAN S'EFFECTUANT PERPENDICULAIREMENT A LA COTE, 24 MARS 2010,       201         FIGURE 95. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA       201         GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, PENOUILLE 4-5
FIGURE 94. DEGLACEMENT DE L'ESTRAN S'EFFECTUANT PERPENDICULAIREMENT A LA COTE, 24 MARS 2010,       201         FIGURE 95. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA       202         FIGURE 95. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA       202         FIGURE 96. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       204         FIGURE 97. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       204         FIGURE 97. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       204         FIGURE 97. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       204         FIGURE 97. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       204         FIGURE 98. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES       205         FIGURE 98. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES       207         FIGURE 99. UNITE HYDROSEDIMENTAIRE DE PABOS.       211         FIGURE 100. DELIMITATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE CHANDLER       212         FIGURE 101. PRISE DE VUE A LA CAMERA DE CHANDLER       213         FIGURE 102. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DE LA CAMERA DE       214
Figure 94. Deglacement de l'estran s'effectuant perpendiculairement a la cote, 24 mars 2010,       201         Figure 95. Saison glacielle, etat d'englacement et niveau de protection verticale assuree par la       202         Figure 96. Relations entre les deplacements negatifs moyens annuels et les parametres       204         Figure 97. Relations entre les deplacements negatifs moyens annuels et les parametres       204         Figure 97. Relations entre les deplacements negatifs moyens annuels et les parametres       204         Figure 97. Relations entre les deplacements negatifs moyens annuels et les parametres       204         Figure 97. Relations entre les deplacements negatifs moyens annuels et les parametres       204         Figure 97. Relations entre les deplacements negatifs moyens annuels et les parametres       204         Figure 97. Relations entre les deplacements negatifs moyens annuels et les parametres       204         Figure 97. Relations entre les deplacements negatifs moyens annuels et les parametres       204         Figure 97. Relations entre les deplacement de la ligne de rivage d'apres les analyses historiques, moyennes       205         Figure 98. Vitesse de deplacement de la ligne de rivage d'apres les analyses historiques, moyennes       207         Figure 99. Unite hydrosedimentaire de Pabos       211         Figure 100. Delimitation du segment d'analyse de Chandler       212         Figure 101. Prise de vue a la camera de Chandler       213
FIGURE 94. DEGLACEMENT DE L'ESTRAN S'EFFECTUANT PERPENDICULAIREMENT A LA COTE, 24 MARS 2010,       PENOUILLE 4-5       201         FIGURE 95. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA       GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, PENOUILLE 4-5       202         FIGURE 96. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       HYDRODYNAMIQUES DE PENOUILLE 4 ET 5       204         FIGURE 97. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       205         FIGURE 97. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       205         FIGURE 98. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES       205         FIGURE 98. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES       207         FIGURE 99. UNITE HYDROSEDIMENTAIRE DE PABOS.       211         FIGURE 100. DELIMITATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE CHANDLER       212         FIGURE 101. PRISE DE VUE A LA CAMERA DE CHANDLER       213         FIGURE 102. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DE LA CAMERA DE       214         FIGURE 103. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA       214
FIGURE 94. DEGLACEMENT DE L'ESTRAN S'EFFECTUANT PERPENDICULAIREMENT A LA COTE, 24 MARS 2010,       201         FIGURE 95. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA       202         FIGURE 95. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA       202         FIGURE 96. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       204         FIGURE 97. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       205         FIGURE 97. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       205         FIGURE 97. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       205         FIGURE 97. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       205         FIGURE 98. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES       205         DES DEPLACEMENTS NEGATIFS MESUREES A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI ET SIMULEES, PENOUILLE 4-5       207         FIGURE 99. UNITE HYDROSEDIMENTAIRE DE PABOS.       211         FIGURE 100. DELIMITATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE CHANDLER       212         FIGURE 101. PRISE DE VUE A LA CAMERA DE CHANDLER       213         FIGURE 102. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DE LA CAMERA DE       214         FIGURE 103. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA       214
FIGURE 94. DEGLACEMENT DE L'ESTRAN S'EFFECTUANT PERPENDICULAIREMENT A LA COTE, 24 MARS 2010,       PENOUILLE 4-5       201         FIGURE 95. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA       GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, PENOUILLE 4-5       202         FIGURE 96. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       HYDRODYNAMIQUES DE PENOUILLE 4 ET 5       204         FIGURE 97. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       205         FIGURE 97. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES       205         FIGURE 98. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES       205         FIGURE 98. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES       207         FIGURE 99. UNITE HYDROSEDIMENTAIRE DE PABOS       211         FIGURE 100. DELIMITATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE CHANDLER       212         FIGURE 101. PRISE DE VUE A LA CAMERA DE CHANDLER       213         FIGURE 102. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DE LA CAMERA DE       214         FIGURE 103. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA       214         FIGURE 104. DETACHEMENT DE MATERIAUX METEORISES VISIBLE SUR LE PIED DE GLACE NIVALE SUR LE SITE DE       219         FIGURE 104. DETACHEMENT DE MATERIAUX METEORISES VISIBLE SUR LE PIED DE GLACE NIVALE SUR LE SITE DE<

FIGURE 106. CONTACT MER/FALAISE SOUS LES CONDITIONS ENERGETIQUES DU 28 DECEMBRE 2012, CHANDLER
Figure 107. État de la cote avant (haut) et apres (bas) conditions energetiques du 28 decembre
2012, LA BASE EST NETTOYEE DE LA SURFACE ALTEREE, CHANDLER
FIGURE 108. EFFONDREMENT D'UN MORCEAU DE DEBORD ORGANIQUE SUR LE SITE DE CHANDLER 224
FIGURE 109. MODIFICATION DU VOLUME (ABAISSEMENT-REHAUSSEMENT) ABAISSEMENT DU PROFIL VISIBLE PRES
DU BLOC SUITE A DES CONDITIONS ENERGETIQUES (ACCUMULATIONS DE SEDIMENTS PLUS GROSSIERS
(GRAVIERS), PRISE DE VUE DU 3 OCTOBRE MONTRE QUE LE PROFIL A RETROUVE LA CONDITION INITIALE DE
LA SEQUENCE
FIGURE 110. CELLULE HYDROSEDIMENTAIRE DE MARIA/GESGAPEGIAG
FIGURE 111. DELIMITATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE MARIA ET DE POINTE-VERTE
FIGURE 112. PRISE DE VUE A LA CAMERA MARIA EST
FIGURE 113. PRISE DE VUE A LA CAMERA MARIA OUEST
FIGURE 114. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DES CAMERAS DE MARIA,
RELEVE PHOTOGRAPHIQUE HELIPORTE DE SEPTEMBRE 2010
Figure 115. Niveau d'eau observe generalement lors de la maree basse; le bas estran n'est pas
DECOUVERT, 4 SEPTEMBRE 2012, CAMERA EST, MARIA237
FIGURE 116. NIVEAU D'EAU OBSERVE OCCASIONNELLEMENT LORS DE LA MAREE BASSE : LE BAS ESTRAN EST
DECOUVERT, 17 OCTOBRE 2012, CAMERA EST, MARIA
FIGURE 117. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA
GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, MARIA
FIGURE 118. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES
hydrodynamiques de Maria240
FIGURE 119. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES
DES DEPLACEMENTS NEGATIFS MESUREES A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI ET SIMULEES, TERRASSES DE
PLAGE, MARIA
Figure 120. Limites du pied de glace de haut estran et position approximative du $D_{MIN}$ , 27 janvier
2012, CAMERA EST, MARIA243
FIGURE 121. PRISE DE VUE A LA CAMERA DE POINTE-VERTE
FIGURE 122. VUE GLOBALE DU SEGMENT D'ANALYSE DE POINTE-VERTE, RELEVE PHOTOGRAPHIQUE HELIPORTE DE
SEPTEMBRE 2010
FIGURE 123. MAREE HAUTE EN CONTACT AVEC LES MURETS ET EN L'ABSENCE DE VAGUES, 13 DECEMBRE 2011,
Pointe-Verte
FIGURE 124. ACCUMULATION DE FRASIL (RIDES) SUR LE HAUT ESTRAN, 3 JANVIER 2013, POINTE-VERTE 249
FIGURE 125. FORMATION DE NOUVELLE GLACE EN SURFACE PAR AGGLOMERATION DE FRASIL
FIGURE 126. SUBMERSION DU PIED DE GLACE DE HAUT ESTRAN ET MINCE COUCHE DE GLACE DE MER, 9 FEVRIER
2013 (pas de vagues), Pointe-Verte251
FIGURE 127. SUBMERSION DU PIED DE GLACE DE HAUT ESTRAN, 19 JANVIER 2015 (PREMIERE IMAGE) ET 21
JANVIER 2015 (IMAGES SUIVANTES), POINTE-VERTE251
FIGURE 128. OUVERTURE D'UN CORRIDOR D'EAU LIBRE SUR LE HAUT ESTRAN OU CIRCULE DE LA GLACE MORCELEE,
25 JANVIER 2012, POINTE-VERTE
FIGURE 120 MODICEAUX ET DADEAUX DE CLACE ECHOLIES SUB L'ESTRAN, 2 MARS 2012, DOINTE-VERTE 252

Figure 130. Niveau d'eau observe generalement lors de la maree basse ; le bas estran n'est pas
DECOUVERT, CAMERA EST
FIGURE 131. NIVEAU D'EAU OBSERVE OCCASIONNELLEMENT LORS DE LA MAREE BASSE : LE BAS ESTRAN EST
DECOUVERT, POINTE-VERTE (VOIR LES LIMITES GEOMORPHOLOGIQUES A LA FIGURE 116)254
FIGURE 132. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA
GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, POINTE-VERTE255
FIGURE 133. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, POINTE-
Verte
Figure 134. Exemple d'erosion derriere un muret, tempete du 6 decembre 2010, Pointe-Verte 259
FIGURE 135. CELLULE HYDROSEDIMENTAIRE DE LA BAIE DE PLAISANCE
FIGURE 136. DELIMITATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE LA MARTINIQUE
FIGURE 137. PRISE DE VUE A LA CAMERA LA MARTINIQUE_ENROCHEMENT
FIGURE 138. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DE LA CAMERA LA
MARTINIQUE_ENROCHEMENT, RELEVE PHOTOGRAPHIQUE HELIPORTE DE SEPTEMBRE 2010
FIGURE 139. PRISE DE VUE A LA CAMERA LA MARTINIQUE_NORD
FIGURE 140. PRISE DE VUE A LA CAMERA LA MARTINIQUE_SUD
FIGURE 141. PRISE DE VUE A LA CAMERA LA MARTINIQUE_LARGE
FIGURE 142. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DES CAMERAS DE LA
Martinique, releve photographique heliporte de septembre 2010
FIGURE 143. CARTE SYNOPTIQUE DE LA CONCENTRATION DE GLACE DE MER DANS L'ESTUAIRE ET LE GOLFE DU
Saint-Laurent en date du 9 mars 2009268
FIGURE 144. CARTE SYNOPTIQUE DU STAGE DE DEVELOPPEMENT DE GLACE DE MER DANS L'ESTUAIRE ET LE GOLFE
du Saint-Laurent en date du 9 mars 2009269
FIGURE 145. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA
GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, LA MARTINIQUE270
FIGURE 146. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES
hydrodynamiques de La Martinique
FIGURE 147. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES
hydrodynamiques de La Martinique, sans les valeurs les extremes
FIGURE 148. ÉVOLUTION DU NETC ET DE L'EROSION ENTRE LE PASSE RECENT ET L'HORIZON 2055, LA
Martinique
FIGURE 149. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES
des deplacements negatifs mesurees a partir des stations de suivi et simulees, La Martinique
FIGURE 150. CELLULE HYDROSEDIMENTAIRE DE POINTE-AUX-LOUPS
FIGURE 151. DELIMITATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE POINTE-AUX-LOUPS
FIGURE 152. PRISE DE VUE A LA CAMERA POINTE-AUX-LOUPS_NORD
FIGURE 153. PRISE DE VUE A LA CAMERA POINTE-AUX-LOUPS_SUD
FIGURE 154. PRISE DE VUE A LA CAMERA POINTE-AUX-LOUPS_LARGE
FIGURE 155. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DES CAMERAS DE POINTE-
AUX-LOUPS, RELEVE PHOTOGRAPHIQUE HELIPORTE DE SEPTEMBRE 2010
FIGURE 156. TRAVAUX DE RECHARGE EN COURS, 2 NOVEMBRE 2010, POINTE-AUX-LOUPS

FIGURE 157. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA
GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, POINTE-AUX-LOUPS
FIGURE 158. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES
HYDRODYNAMIQUES DE POINTE-AUX-LOUPS
FIGURE 159. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES
HYDRODYNAMIQUES DE POINTE-AUX-LOUPS, SANS LES VALEURS LES EXTREMES
FIGURE 160. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES
DES DEPLACEMENTS NEGATIFS MESUREES A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI ET SIMULEES, POINTE-AUX-
LOUPS
FIGURE 161. CELLULE HYDROSEDIMENTAIRE DE POINTE-LEBEL
FIGURE 162. DELIMITATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE POINTE-LEBEL
FIGURE 163. PRISE DE VUE A LA CAMERA POINTE-LEBEL GLACE
FIGURE 164. PRISE DE VUE A LA CAMERA POINTE-LEBEL 1 ET VUE OBLIQUE DU LITTORAL
FIGURE 165. PRISE DE VUE A LA CAMERA POINTE-LEBEL 2 ET VUE OBLIQUE DU LITTORAL
FIGURE 166. GEL DES RESURGENCES SUR LE HAUT ESTRAN, CAMERA 1, POINTE-LEBEL
FIGURE 167. ACCUMULATION SUR LE PIED DE GLACE DE SEDIMENTS DEPLACES PAR LES RESURGENCES : EXEMPLES
DU 14 FEVRIER 2013 ET DU 4 MARS 2013, BAIE-SAINT-LUDGER
FIGURE 168. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA
GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, POINTE-LEBEL
FIGURE 169. CELLULE HYDROSEDIMENTAIRE DE BAIE-SAINT-LUDGER
FIGURE 170. DELIMITATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE BAIE-SAINT-LUDGER
FIGURE 171. PRISE DE VUE A LA CAMERA BAIE-SAINT-LUDGER 1 ET 6 EST (REIMPLANTATION LOCALISEE A 150 M
AU SUD-OUEST DE LA CAMERA 1)
FIGURE 172. PRISE DE VUE A LA CAMERA DE BAIE-SAINT-LUDGER 2 ET 6 OUEST (REIMPLANTATION LOCALISEE A
150 m au sud-ouest de la camera 2)
FIGURE 173. PRISE DE VUE A LA CAMERA BAIE-SAINT-LUDGER 3
FIGURE 174. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DES CAMERAS 1 + 6_EST
ET 2 + 6_OUEST, RELEVE PHOTOGRAPHIQUE HELIPORTE DE SEPTEMBRE 2010
FIGURE 175. SAISON GLACIELLE ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA GLACE DE HAUT ET DE BAS
estran, Baie Saint-Ludger
FIGURE 176. CELLULE HYDROSEDIMENTAIRE DE LA POINTE AUX ANGLAIS
FIGURE 177. DELIMITATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE RIVIERE PENTECOTE (CAM A N'EST PAS INCLUS DANS LES
CAMERAS UTILISEES POUR LES RELATIONS EMPIRIQUES)
FIGURE 178. PRISE DE VUE A LA CAMERA PEN_A_SUD ET VUE OBLIQUE DU LITTORAL
FIGURE 179. PRISE DE VUE A LA CAMERA PEN_B_FLEUVE ET VUE OBLIQUE DU LITTORAL
FIGURE 180. PRISE DE VUE A LA CAMERA PEN_C_SUD ET VUE OBLIQUE DU LITTORAL
FIGURE 181. PRISE DE VUE A LA CAMERA PEN_D ET VUE OBLIQUE DU LITTORAL
FIGURE 182. PRISE DE VUE A LA CAMERA PEN_E ET VUE OBLIQUE DU LITTORAL
FIGURE 183. BARRE SABLEUSE VISIBLE A MAREE BASSE, 12 AVRIL 2013, RIVIERE PENTECOTE
FIGURE 184. CORDON DE FRASIL, 25 JANVIER 2012, RIVIERE PENTECOTE, CAMERA C_SUD
FIGURE 185. ACCUMULATION DE SEDIMENTS SUR LE PIED DE GLACE (LE 17 FEVRIER 2013 SANS ACCUMULATION
DE SEDIMENT ET DURANT L'EPISODE DE VAGUES DU 18 FEVRIER 2013, AVEC SEDIMENTS)

FIGURE 186. FUSION DE RADEAUX DE GLACE SUR PLACE AU CONTACT DE LA MAREE (SANS DEPLACEMENT DES	
radeaux), 2 mars 2013, Riviere Pentecote33	9
FIGURE 187. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA	
GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, RIVIERE PENTECOTE	0
FIGURE 188. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES	
HYDRODYNAMIQUES DE RIVIERE PENTECOTE	2
FIGURE 189. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES	
HYDRODYNAMIQUES DE RIVIERE PENTECOTE, SANS LES VALEURS LES EXTREMES	3
FIGURE 190. ÉVOLUTION DU NETC ET DE L'EROSION ENTRE LE PASSE RECENT ET L'HORIZON 2055, RIVIERE	
Pentecote	6
FIGURE 191. VEGETALISATION DE LA PARTIE SUPERIEURE DU HAUT ESTRAN DEVANT LES TRANSECTS 11, 12 ET 13	3
et non devant le transect 9 en aval du cours d'eau, Pentecote	8
FIGURE 192. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES	5
DES DEPLACEMENTS NEGATIFS MESUREES A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI ET SIMULEES, RIVIERE	
Pentecote	9
FIGURE 193. CELLULE HYDROSEDIMENTAIRE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN	3
FIGURE 194. DELIMITATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE RIVIERE SAINT-JEAN	54
FIGURE 195. PRISE DE VUE A LA CAMERA RIVIERE-SAINT-JEAN 1 ET RIVIERE-SAINT-JEAN 2	55
FIGURE 196. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DES CAMERAS RIVIERE-	
SAINT-JEAN 1 ET 2, RELEVE PHOTOGRAPHIQUE HELIPORTE DE SEPTEMBRE 2010	6
FIGURE 197. PRISE DE VUE A LA CAMERA DE RIVIERE-SAINT-JEAN 3 ET VUE OBLIQUE DU LITTORAL	57
FIGURE 198. PRISE DE VUE A LA CAMERA RIVIERE-SAINT-JEAN « SANS NOM » ET GLACE	8
FIGURE 199. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DES CAMERAS RIVIERE	
SAINT-JEAN « SANS NOM » ET GLACE	;9
FIGURE 200. PRISE DE VUE A LA CAMERA RIVIERE-SAINT-JEAN FALAISE ET VUE OBLIQUE DU LITTORAL	60
FIGURE 201. PRISE DE VUE A LA CAMERA RIVIERE-SAINT-JEAN 4 ET VUE OBLIQUE DU LITTORAL	51
FIGURE 202. ACCUMULATION DE SEDIMENTS SUR LE PIED DE GLACE LORS DU DEGEL DE LA FALAISE, 29 MARS	
2009, Riviere Saint-Jean	5
FIGURE 203. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA	
glace de haut et de bas estran, Riviere Saint-Jean	6
FIGURE 204. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES	5
des deplacements negatifs mesurees a partir des stations de suivi, Riviere Saint-Jean	8
FIGURE 205. ÉVOLUTION DE LA PROFONDEUR DE SEDIMENTS ATTEINTS PAR LE GEL (M) SELON LES 8 SCENARIOS	
UTILISES DANS BERNATCHEZ ET AL. (2014), RIVIERE SAINT-JEAN	0'
FIGURE 206. CELLULE HYDROSEDIMENTAIRE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN (1/2)	'5
FIGURE 207. CELLULE HYDROSEDIMENTAIRE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN (2/2)	6'
FIGURE 208. DELIMITATION DES SEGMENTS D'ANALYSE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST ET B_OUEST	
	7
FIGURE 209. DELIMITATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN D	8
FIGURE 210. PRISE DE VUE A LA CAMERA LPM_D_OUEST	'9
FIGURE 211. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DE LA CAMERA LPM_D	
(SEGMENT D'ANALYSE 1), RELEVE PHOTOGRAPHIQUE HELIPORTE DE SEPTEMBRE 2010	'9

<ul> <li>FIGURE 213. PRISE DE VUE AUX CAMERAS LPM_C_EST ET LPM_RSJ_C_EST, PREMIER SEGMENT D'ANALYSE</li> <li>381</li> <li>FIGURE 214. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DES CAMERAS LPM_C_EST ET LPM_C_OUEST, RSJ_EST ET RSJ_OUEST, PREMIER SEGMENT D'ANALYSE, RELEVE PHOTOGRAPHIQUE HELIPORTE DE SEPTEMBRE 2010</li></ul>
<ul> <li>FIGURE 213. PRISE DE VUE AUX CAMERAS LPM_C_EST ET LPM_RSJ_C_EST, PREMIER SEGMENT D'ANALYSE</li> <li>381</li> <li>FIGURE 214. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DES CAMERAS LPM_C_EST ET LPM_C_OUEST, RSJ_EST ET RSJ_OUEST, PREMIER SEGMENT D'ANALYSE, RELEVE PHOTOGRAPHIQUE HELIPORTE DE SEPTEMBRE 2010</li> <li>782</li> <li>FIGURE 215. PRISE DE VUE A LA CAMERA LPM_B_OUEST</li> <li>383</li> <li>FIGURE 216. PRISE DE VUE A LA CAMERA LPM_B_EST</li> <li>385</li> <li>FIGURE 217. FRASIL SUR LES EAUX COTIERES, 28 DECEMBRE 2013, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST</li> <li>388</li> <li>FIGURE 218. CORDON DE FRASIL ET FRASIL DANS LES EAUX COTIERES, 14 DECEMBRE 2013, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST</li> <li>388</li> <li>FIGURE 219. ACCUMULATION DE FRASIL EN UNE SUCCESSION DE CORDONS SUR LE HAUT ESTRAN, 29 NOVEMBRE, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST</li> <li>389</li> <li>FIGURE 220. VAGUES FRAPPANT LE FRONT DU PIED DE GLACE ET SUBMERSION DU PIED DE GLACE, 12 FEVRIER</li> </ul>
381 FIGURE 214. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DES CAMERAS LPM_C_EST ET LPM_C_OUEST, RSJ_EST ET RSJ_OUEST, PREMIER SEGMENT D'ANALYSE, RELEVE PHOTOGRAPHIQUE HELIPORTE DE SEPTEMBRE 2010
<ul> <li>FIGURE 214. PRISE DE VUE OBLIQUE DU LITTORAL DANS LE SECTEUR D'IMPLANTATION DES CAMERAS LPM_C_EST ET LPM_C_OUEST, RSJ_EST ET RSJ_OUEST, PREMIER SEGMENT D'ANALYSE, RELEVE PHOTOGRAPHIQUE HELIPORTE DE SEPTEMBRE 2010</li></ul>
ET LPM_C_OUEST, RSJ_EST ET RSJ_OUEST, PREMIER SEGMENT D'ANALYSE, RELEVE PHOTOGRAPHIQUE HELIPORTE DE SEPTEMBRE 2010
HELIPORTE DE SEPTEMBRE 2010       382         FIGURE 215. PRISE DE VUE A LA CAMERA LPM_B_OUEST       383         FIGURE 216. PRISE DE VUE A LA CAMERA LPM_B_EST       385         FIGURE 217. FRASIL SUR LES EAUX COTIERES, 28 DECEMBRE 2013, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST       388         FIGURE 218. CORDON DE FRASIL ET FRASIL DANS LES EAUX COTIERES, 14 DECEMBRE 2013, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST (CAMERA B_LARGE)       388         FIGURE 219. ACCUMULATION DE FRASIL EN UNE SUCCESSION DE CORDONS SUR LE HAUT ESTRAN, 29 NOVEMBRE, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST       389         FIGURE 220. VAGUES FRAPPANT LE FRONT DU PIED DE GLACE ET SUBMERSION DU PIED DE GLACE, 12 FEVRIER       389
FIGURE 215. PRISE DE VUE A LA CAMERA LPM_B_OUEST       383         FIGURE 216. PRISE DE VUE A LA CAMERA LPM_B_EST       385         FIGURE 217. FRASIL SUR LES EAUX COTIERES, 28 DECEMBRE 2013, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST.       388         FIGURE 218. CORDON DE FRASIL ET FRASIL DANS LES EAUX COTIERES, 14 DECEMBRE 2013, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST (CAMERA B_LARGE)       388         FIGURE 219. ACCUMULATION DE FRASIL EN UNE SUCCESSION DE CORDONS SUR LE HAUT ESTRAN, 29 NOVEMBRE, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST       389         FIGURE 220. VAGUES FRAPPANT LE FRONT DU PIED DE GLACE ET SUBMERSION DU PIED DE GLACE, 12 FEVRIER       389
FIGURE 216. PRISE DE VUE A LA CAMERA LPM_B_EST       385         FIGURE 217. FRASIL SUR LES EAUX COTIERES, 28 DECEMBRE 2013, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST
<ul> <li>FIGURE 217. FRASIL SUR LES EAUX COTIERES, 28 DECEMBRE 2013, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST 388</li> <li>FIGURE 218. CORDON DE FRASIL ET FRASIL DANS LES EAUX COTIERES, 14 DECEMBRE 2013, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST (CAMERA B_LARGE)</li></ul>
FIGURE 218. CORDON DE FRASIL ET FRASIL DANS LES EAUX COTIERES, 14 DECEMBRE 2013, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST (CAMERA B_LARGE)
MINGAN B_EST (CAMERA B_LARGE)
FIGURE 219. ACCUMULATION DE FRASIL EN UNE SUCCESSION DE CORDONS SUR LE HAUT ESTRAN, 29 NOVEMBRE,         LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST         389         FIGURE 220. VAGUES FRAPPANT LE FRONT DU PIED DE GLACE ET SUBMERSION DU PIED DE GLACE, 12 FEVRIER
LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST
FIGURE 220. VAGUES FRAPPANT LE FRONT DU PIED DE GLACE ET SUBMERSION DU PIED DE GLACE, 12 FEVRIER
2013, Longue-Pointe-de-Mingan B_est (camera B_large)
FIGURE 221. ACCUMULATION DE SEDIMENT SUR LE PIED DE GLACE DE HAUT ESTRAN, 4 MARS 2013, LONGUE-
POINTE-DE-MINGAN B (CAMERA VERS DE LARGE POSITIONNEE A LA LIMITE B_EST ET B_OUEST)
FIGURE 222. DEPRESSIONS SUR LA PLAGE FORMEES A LA SUITE DE LA FONTE DE BLOCS DE GLACE ENFOUIS, 2 MAI
2014, Longue-Pointe-de-Mingan B
FIGURE 223. DEPRESSIONS SUR LA PLAGE FORMEES A LA SUITE DE LA FONTE DE BLOCS DE GLACE ENFOUIS, 2 MAI
2014, Longue-Pointe-de-Mingan B
FIGURE 224. CRETE DE SEDIMENTS POST-GLACIELLE, 13 MAI 2014, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B EST 393
FIGURE 225. CRETE DE SEDIMENTS POST-GLACIELLE, 9 MAI 2014, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN (CAMERA VERS
DE LARGE POSITIONNEE A LA LIMITE B_EST ET B_OUEST)
FIGURE 226. CONCENTRATION DE GLACE SUR LE BAS ESTRAN, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_EST
FIGURE 227. CONCENTRATION DE GLACE SUR LE BAS ESTRAN, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_OUEST
FIGURE 228. CONCENTRATION DE GLACE SUR LE BAS ESTRAN, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN D
FIGURE 229. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA
GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B EST
FIGURE 230. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA
GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B OUEST
FIGURE 231. SAISON GLACIELLE, ETAT D'ENGLACEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION VERTICALE ASSUREE PAR LA
GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN D
FIGURE 232. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES
HYDRODYNAMIQUES DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B EST
FIGURE 233. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES
HYDRODYNAMIQUES DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B EST. SANS LES VALEURS LES EXTREMES
FIGURE 234. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES
HYDRODYNAMIQUES DE LONGUE-POINTF-DE-MINGAN B OLIFST 403
FIGURE 235. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIES MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES
HYDRODYNAMIQUES DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B OUEST. SANS LES VALEURS LES EXTREMES 404

FIGURE 236. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES
HYDRODYNAMIQUES DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN D
FIGURE 237. RELATIONS ENTRE LES DEPLACEMENTS NEGATIFS MOYENS ANNUELS ET LES PARAMETRES
hydrodynamiques de Longue-Pointe-de-Mingan D, sans les valeurs les extremes
FIGURE 238. MIGRATION D'UN CORPS SABLEUX VERS L'EST (DANS LE SENS DE LA DERIVE LITTORALE) ET
elargissement du haut estran entre 2014 et 2017, Longue-Pointe-de-Mingan B_Est et
B_OUEST
FIGURE 239. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES
des deplacements negatifs mesurees a partir des stations de suivi, Longue-Pointe-de-Mingan
D
FIGURE 240. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES
des deplacements negatifs mesurees a partir des stations de suivi, Longue-Pointe-de-Mingan
B_Est
FIGURE 241. VITESSE DE DEPLACEMENT DE LA LIGNE DE RIVAGE D'APRES LES ANALYSES HISTORIQUES, MOYENNES
des deplacements negatifs mesurees a partir des stations de suivi, Longue-Pointe-de-Mingan
B_OUEST
FIGURE 242. CHARGE SEDIMENTAIRE VISIBLE DANS UN MORCEAU DE GLACE STRATIFIEE, AVRIL 2014, LONGUE-
POINTE-DE-MINGAN
FIGURE 243. ACCUMULATION DE SABLE SUR LA SURFACE DU PIED DE GLACE, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 414
FIGURE 244. ACCUMULATION DE SABLE SUR LA SURFACE DU PIED DE GLACE, 5 AVRIL 2008, LONGUE-POINTE-DE-
Mingan
FIGURE 245. CRETE DE SEDIMENTS POST-GLACIEL SUR LE HAUT ESTRAN A LONGUE-POINTE-DE-MINGAN EN MAI
2014
FIGURE 246. PROFILS INITIAUX DE DECEMBRE 2013, DE LA SAISON GLACIELLE ET POST-GLACIELLE AVEC
REHAUSSEMENT PAR ACCUMULATION DE SEDIMENT POST-GLACIELS (CRETE), KM-REPERE 4,40
FIGURE 247. PROFILS DE DECEMBRE 2013 ET DE JANVIER 2014 AU KM-REPERE 4,75
FIGURE 248. PROFILS DE DECEMBRE 2013 ET DE JANVIER 2014 ET DE FEVRIER 2014 AU KM-REPERE 4,75420
FIGURE 249. PROFILS DE DECEMBRE 2013 ET DE FEVRIER 2014 ET DE MARS 2014 AU KM-REPERE 4,75 421
FIGURE 250. PROFILS DE DECEMBRE 2013 ET DE MARS 2014 ET D'AVRIL 2014 AU KM-REPERE 4,75
FIGURE 251. PROFILS DE DECEMBRE 2013 ET D'AVRIL 2014 ET DE MAI 2014 AU KM-REPERE 4,75
FIGURE 252. PROFILS DE DECEMBRE 2013 ET DE MAI 2014 ET DE JUIN 2014 AU KM-REPERE 4,75
FIGURE 253. PROFILS POST-GLACIEL DE MAI 2013 ET MAI 2014 PRESENTANT UNE FORME CONCAVE AUX KM-
REPERE 4,55 ET 4,75
FIGURE 254. PROFILS INITIAUX DE DECEMBRE 2013, DE LA SAISON GLACIELLE ET POST-GLACIELLE AVEC
REHAUSSEMENT PAR ACCUMULATION DE SEDIMENT POST-GLACIELS (CRETE) ET ABAISSEMENT SUR LA PARTIE
INFERIEURE DU HAUT ESTRAN, KM-REPERE 8,45
FIGURE 255. MEDIANE DE LA CONCENTRATION DES GLACES 1981-2010 POUR LA SEMAINE DU 8 JANVIER 431
FIGURE 256. MEDIANE DE LA CONCENTRATION DES GLACES 1981-2010 POUR LA SEMAINE DU 15 JANVIER 432
FIGURE 257. MEDIANE DE LA CONCENTRATION DES GLACES 1981-2010 POUR LA SEMAINE DU 22 JANVIER 433
FIGURE 258. MEDIANE DE LA CONCENTRATION DES GLACES 1981-2010 POUR LA SEMAINE DU 26 MARS 434
FIGURE 259. PRESENCE TARDIVE DE GLACE SUR LE BAS ESTRAN ET SIGNE D'AFFAIBLISSEMENTS DE LA BANQUISE
PREALABLES AU DEGLACEMENT (FUSION EN SURFACE ET FISSURES) DEVANT PENOUILLE 4-5, 28 AVRIL 2014

FIGURE 260. MEDIANE DE LA CONCENTRATION DES GLACES 1981-2010 POUR LA SEMAINE DU 25 DECEMBRE
Figure 261. Zoom sur l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent sur la carte de la mediane de la
CONCENTRATION DES GLACES 1981-2010 POUR LA SEMAINE DU 25 DECEMBRE
FIGURE 262. RESEAU BAYESIEN REPRESENTANT LES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES INFLUENÇANT L'EVOLUTION
COTIERE, ZONES COTIERES SANS GLACE
FIGURE 263. RESEAU BAYESIEN REPRESENTANT LES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES INFLUENÇANT L'EVOLUTION
COTIERE, ZONES COTIERES AVEC GLACE

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. NOMBRE DE JOURS VISIONNES ET CARACTERISES ET NOMBRE DE JOURS COUVERTS CORRESPONDANTS
TABLEAU 2. ÉTAT D'ENGLACEMENT DU HAUT ESTRAN
TABLEAU 3. ÉTAT D'ENGLACEMENT DU BAS ESTRAN
TABLEAU 4. DEFINITIONS DE L'INDICE DE PROTECTION VERTICALE SUR LE HAUT ESTRAN
TABLEAU 5. EXEMPLE DE TABLEAU DE CONVERSION POUR ETABLIR L'INDICE DE PROTECTION VERTICALE SUR LE
HAUT ESTRAN
TABLEAU 6. DEFINITIONS DE L'INDICE DE PROTECTION SUR LE BAS ESTRAN
TABLEAU 7. INDICE DE PROTECTION SUR LE BAS ESTRAN
TABLEAU 8. VARIABLES UTILISEES PRODUITES A PARTIR DE SIMULATIONS REALISTES POUR LA PERIODE 2000-2015
TABLEAU 9. SIMULATIONS CLIMATIQUES UTILISEES POUR PRODUIRE LES CONDITIONS DE GLACE POUR LA
PERIODE 1981-2070
TABLEAU 10. DESCRIPTIFS DU CONTENU DES COLONNES DU TABLEAU 11
TABLEAU 11. PARAMETRES NUMERIQUES UTILISES DANS LES RELATIONS EMPIRIQUES
TABLEAU 12. CORRELATION DE PEARSON ENTRE LE PIED DE GLACE OBSERVE ET MODELISE ET ERREUR
QUADRATIQUE MOYENNE CALCULEE SUR TOUTE L'ANNEE. LA DUREE D'ENGLACEMENT ET LES VALEURS
MODELISEES SONT PRES DES OBSERVATIONS LORSQU'UN X EST PRESENT. DES COMMENTAIRES SUR DES BIAIS
POSSIBLES DUS AUX RELATIONS EMPIRIQUES SONT PRESENTES DANS LA DERNIERE COLONNE
TABLEAU 13. CARACTERISTIQUES DES COTES DU SEGMENT D'ANALYSE DE SAINT-ULRIC (2010)
TABLEAU 14. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU HAUT ESTRAN DU SEGMENT D'ANALYSE DE SAINT-ULRIC
TABLEAU 15. ÉVALUATION DE L'EFFET DE PROTECTION OFFERT PAR LA GLACE DURANT LA PERIODE 2004-2015
POUR LE SITE DE SAINT-ULRIC
TABLEAU 16. CARACTERISATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE RIVIERE-A-CLAUDE (2010)
TABLEAU 17. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU HAUT ESTRAN DU SEGMENT D'ANALYSE DE RIVIERE-A-
Claude
TABLEAU 18. ÉVALUATION DE L'EFFET DE PROTECTION OFFERT PAR LA GLACE DURANT LA PERIODE 2007-2015
POUR LE SITE DE RIVIERE-CLAUDE
TABLEAU 19. CARACTERISATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE PENOUILLE 1-3 (2010)
TABLEAU 20. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU HAUT ESTRAN DU SEGMENT D'ANALYSE DE PENOUILLE 1-
3179
TABLEAU 21. ÉVALUATION DE L'EFFET DE PROTECTION OFFERT PAR LA GLACE DURANT LA PERIODE 2006-2015
POUR LE SITE DE PENOUILLE 1-3
TABLEAU 22. CARACTERISATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE PENOUILLE 4-5 (2010)
TABLEAU 23. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU HAUT ESTRAN DU SEGMENT D'ANALYSE DE PENOUILLE 4-
5
TABLEAU 24. CARACTERISATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE CHANDLER (2010)       215
TABLEAU 25. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU HAUT ESTRAN DU SEGMENT D'ANALYSE DE CHANDLER
TABLEAU 26. CARACTERISATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE MARIA (2010)

TABLEAU 27. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU HAUT ESTRAN DU SEGMENT D'ANALYSE DE MARIA 233
TABLEAU 28. CARACTERISATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE POINTE-VERTE (2010)       247
TABLEAU 29. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU HAUT ESTRAN DU SEGMENT D'ANALYSE DE MARIA 247
TABLEAU 30. CARACTERISTIQUES DES COTES DU SEGMENT D'ANALYSE DE LA MARTINIQUE (2010)
TABLEAU 31. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU HAUT ESTRAN DU SEGMENT D'ANALYSE DE LA
MARTINIQUE
TABLEAU 32. ÉVALUATION DE L'EFFET DE PROTECTION OFFERT PAR LA GLACE DURANT LA PERIODE 2006-2015
POUR LE SITE DE LA MARTINIQUE
TABLEAU 33. CARACTERISATION DES COTES DU SEGMENT D'ANALYSE DE POINTE-AUX-LOUPS (2010)
TABLEAU 34. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU HAUT ESTRAN DU SEGMENT D'ANALYSE DE POINTE-AUX-
Loups
TABLEAU 35. DATE DU PREMIER JOUR OU DES TRAVAUX DE RECHARGES ONT PU ETRE CAPTES A PARTIR DES
IMAGES DES CAMERAS POUR LE SITE DE POINTE-AUX-LOUPS (TRAVAUX POUVANT S'ETENDRE SUR QUELQUES
JOURS)
TABLEAU 36. CARACTERISATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE POINTE-LEBEL (2010)
TABLEAU 37. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU HAUT ESTRAN DU SEGMENT D'ANALYSE DE POINTE-LEBEL
TABLEAU 38. CARACTERISATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE BAIE-SAINT-LUDGER (2010)
TABLEAU 39. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU HAUT ESTRAN DU SEGMENT D'ANALYSE DE BAIE-SAINT-
LUDGER
TABLEAU 40. CARACTERISATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE RIVIERE PENTECOTE (2010)
TABLEAU 41. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU HAUT ESTRAN DU SEGMENT D'ANALYSE DE RIVIERE
Рептесоте
TABLEAU 42. RIVIERE PENTECOTE ÉVALUATION DE L'EFFET DE PROTECTION OFFERT PAR LA GLACE DURANT LA
PERIODE 2001-2014 POUR LE SITE DE RIVIERE PENTECOTE
TABLEAU 43. CARACTERISATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE RIVIERE SAINT-JEAN (2010)
TABLEAU 44. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU HAUT ESTRAN DU SEGMENT D'ANALYSE DE RIVIERE
Saint-Jean
TABLEAU 45. ÉVOLUTION DE LA PROFONDEUR DE SEDIMENTS ATTEINTS PAR LE GEL (M) SELON LES 8 SCENARIOS
UTILISES DANS BERNATCHEZ ET AL. (2014), RIVIERE SAINT-JEAN
TABLEAU 46. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU HAUT ESTRAN DU SEGMENT D'ANALYSE DE LONGUE-
POINTE-DE-MINGAN D
TABLEAU 47. CARACTERISATION DU SEGMENT D'ANALYSE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN B_OUEST (2010)
TABLEAU 48. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU HAUT ESTRAN DU SEGMENT D'ANALYSE DE LONGUE-
POINTE-DE-MINGAN B_OUEST
TABLEAU 49. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU HAUT ESTRAN DU SEGMENT D'ANALYSE DE LONGUE-
POINTE-DE-MINGAN B_EST
TABLEAU 50. ÉVOLUTION DE LA DUREE DE LA SAISON GLACIELLE SUR LE HAUT ESTRAN
TABLEAU 51. ÉVOLUTION DE LA DUREE DE LA SAISON GLACIELLE SUR LE BAS ESTRAN

# LISTE DES ABBRÉVIATIONS

BE : Bas estran

CGDM : Concentration de glace de mer

DHGE : Degrés-heures de gel

DHDG : Degrés-heures de dégel

DJ : Degrés-jours

EGSL : Estuaire et golfe du Saint-Laurent

ESL : Estuaire du Saint-Laurent

GDM : Glace de mer

GEM : Global Environmental Multiscale Model

GIEC : Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

GSL : Golfe du Saint-Laurent

HE : Haut estran

IBSP : Indice de budget sédimentaire des plages

ISMER : Institut des Sciences de la Mer

LDGIZC : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières

JGÉC : Jour de glace où l'indice de protection par la glace est dite élevée (0.75) ou complète (1)

JSG : Jour sans glace

MODESCO : Modélisation de la Morphodynamique de l'Érosion et de la Submersion Côtière dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent

MOR : Modèle océanique régional

MPO : Pêches et Océans Canada

MRCC : Modèle Régional Climatique Canadien

MVEG : Modèle de vagues de l'estuaire et du golfe

NARR : North American Regional Reanalysis

NCEP : National Centers for Environmental Prediction

NETC: Niveau d'eau total à la côte (niveau d'eau + jet de rive)

OOM : Organisation météorologique mondiale

PDG : Pied de glace

PDGI : Pied de glace incomplet

PDGC : Pied de glace complet

PM : Péninsule de Manicouagan

RP : Rupture de pente

RSO : Radar à synthèse d'ouverture

SCG : Service Canadien des Glaces

SRES : renvoie aux scénarios décrits dans Special Report Emissions scenarios

TAC : Total accumulé de la couverture des glaces

# 1. INTRODUCTION

## 1.1. Contexte et problématique

Dans le contexte des changements climatiques, l'augmentation des températures de l'air provoquera une diminution de la couverture et du volume de glace de mer. À l'échelle de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, une diminution de 67 % de la couverture et de 69 % du volume de glace de mer est attendue pour l'horizon 2055 (2041-2070) par rapport aux conditions du passé récent (1981-2010) (Senneville et al. 2014). Déjà, à la lumière du suivi effectué par le Service canadien des glaces (SCG), on observe que le pourcentage de couverture de glace pour le total cumulé (TAC) est passé de 14,16 % durant la période 1968-1997 (29 ans) à 8,55 % durant la période 1998-2017 (20 ans). Les conditions climatiques futures menacent le développement du complexe glaciel côtier (pied de glace de haut et de bas estran et banquise côtière) jusqu'à le réduire à la zone de haut estran ou à l'éliminer complètement. En l'absence des autres composantes du complexe glaciel côtier, le pied de glace de haut estran est la dernière entité glacielle à se développer. Les résultats du projet X012.1 « Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques » obtenus sur des sites d'étude de la Côte-Nord et des Îles-de-la-Madeleine indiquent que le nombre de jours où le pied de glace sera complet subira une diminution de l'ordre de 38 à 53 jours (Senneville et al. 2014).

Or la glace de mer comme l'ensemble du complexe glaciel côtier assure un rôle de protection des côtes contre l'assaut des agents hydrodynamiques. D'une part, la glace de mer limite l'étendue du fetch et donc la formation de vagues par le vent. De plus, l'énergie des vagues est dissipée lorsque celles-ci entrent en contact avec la glace de mer. D'autre part, le rôle de protection du pied de glace de haut estran plus spécifiquement fait l'objet d'un consensus dans la littérature et apparaît, peu importe les caractéristiques de la côte (Barnes et al. 1993; Croasdale et Marcellus 1978; Davies et al. 1976; Dionne 1973, 1976; Forbes et Taylor 1994; Forbes et al. 2004, 2002; Hume et Schalk 1976; Joyce 1950; Marsh et al. 1973; Mccann et Taylor 1975; Moign 1976; Nielson 1988; Owens 1976; Wiseman et al. 1981; Zumberge et Wilson 1953). En effet, la présence du pied de glace limite ou inhibe presque complètement l'emprise des processus hydrodynamiques (vagues) qui sont souvent plus puissants durant la saison froide. Cette protection hivernale permet aussi de réduire la période de transfert de sédiment durant l'année comparativement aux côtes qui ne sont pas affectées par les phénomènes

glaciels (BaMasoud et Byrne 2012; Hume et Schalk 1976; Marsh et al. 1973; Nielson 1988; Owens 1976; Wiseman et al. 1981). La diminution partielle ou totale des effets des processus hydrodynamiques et notamment des tempêtes d'automne et d'hiver par les glaces réduit la période de transfert de sédiment durant l'année. Hume et Schalk (1976), qui étudient le secteur de Pointe Barrow en Alaska, indiquent que le transport littoral n'équivaut qu'à 3 % de celui des régions tempérées dont les caractéristiques topographiques sont comparables. Une proportion inférieure qui s'explique par l'inhibition ou le ralentissement des processus propres à l'interglaciel. La réduction du transport sédimentaire associée à la présence de glace de rive est également mise en lumière par Marsh et al. (1973) sur les rives du Lac-Supérieur : *« the net sediment transport along the south-eastern shore of Lake Superior is on the order of 11 times greater than that along selected segments of the Arctic shoreline where icefoot formation is known to occur but is much less than that along comparable ice-free coasts ».* 

Les côtes basses sablonneuses et les côtes à falaises meubles et consolidées, spécifiquement celles constituées de grès, qui évoluent principalement sous l'effet des agents hydrodynamiques sont particulièrement sensibles aux modifications attendues de l'état d'englacement du littoral. Ces types de côtes présentent des valeurs de déplacements négatifs de la ligne de rivage parmi les plus élevées et sont les plus sensibles aux vagues de tempête et aux modifications du régime hydrosédimentaire des plages. Plus spécifiquement, l'évolution des côtes basses sablonneuses est directement liée à la variabilité du bilan sédimentaire des plages et donc aux processus et agents, tels que la glace, qui peuvent modifier les apports sédimentaires ou favoriser l'accumulation ou l'érosion des sédiments.

À la lumière de ces affirmations, de nouvelles connaissances scientifiques doivent être acquises afin d'assurer une gestion des infrastructures et des territoires côtiers de même qu'un développement de solutions d'adaptation qui tiennent compte des modifications climatiques futures anticipées.

D'une part, les solutions d'adaptation conçues pour protéger les infrastructures côtières sont développées en grande partie en fonction du climat de vagues pouvant atteindre la côte ainsi que la durée de la période à laquelle la côte et les infrastructures seront exposées aux agents hydrodynamiques. Or, comme mentionné plus haut, on prévoit un allongement de la période où le haut estran sera libre de glace ce qui pourrait se traduire par une plus grande exposition des côtes aux vagues hivernales et aux vagues de tempêtes ce qui implique des conséquences sur la dynamique côtière, notamment sur le bilan sédimentaire et l'évolution du trait de côte (Bernatchez et Dubois 2004, 2008).

Actuellement, on ne retrouve dans la littérature aucun outil permettant d'estimer la période future d'expositions des côtes dans ce contexte de changements. Seuls les travaux effectués dans le cadre du projet X012.1 « Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques » ont permis le développement de relations empiriques permettant de prévoir l'état d'englacement du haut estran. Ces relations, étant basées sur un nombre restreint de saisons et de sites de suivi (entre 1 et 4 saisons), seront améliorées grâce à l'intégration de nouvelles saisons et de nouveaux sites de suivi dans le cadre du présent projet. Les résultats des premiers travaux ont permis de constater que certaines caractéristiques morphologiques de l'estran et le type de côte influencent la durée, l'extension et la stabilité du pied de glace. Or l'influence des caractéristiques morphologiques de la zone côtière sur la dynamique du pied de glace est peu connue et souvent qualitative. Il est donc actuellement hasardeux de généraliser ces résultats préliminaires à l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent et des secteurs où les infrastructures routières sont vulnérables.

D'autre part, la compréhension des conséquences de l'état d'englacement du haut estran sur l'évolution de la ligne de rivage est extrêmement limitée. En effet, les études réalisées sur le pied de glace ont surtout porté sur les processus et modes d'englacement et de déglacement des plages en milieu arctique, subarctique ou tempéré, sur l'effet de la glace dans les milieux de sédimentation fine (surtout dans les marais) et sur les caractéristiques morphologiques du pied de glace en fonction des conditions hydrologiques et météorologiques de mise en place. À l'échelle de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, les travaux qui ont porté directement ou indirectement sur le complexe glaciel côtier ou le pied de glace sont ceux de Dionne (1973, 1993), Lessard et Dubois (1984), Troude et Sérodes (1988), Bouchard (1997), Bernatchez et Leblanc (2000), Bernatchez et Dubois (2004), Moign (1972) et Manson et al. (2002). À notre connaissance, seuls les travaux de Bernatchez et al. (2008) et de BaMasoud et Byrne (2012) ont permis de mettre en relation les conditions de glace avec l'évolution du trait de côte. Les travaux de Bernatchez et al. (2008) ont permis de comparer des périodes d'évolution du trait de côte (intervalles pluriannuels tributaires des dates d'acquisition des orthophotographies) avec les conditions climatiques prévalant durant celles-ci. Les résultats obtenus indiquent qu'aux Îles-de-la-Madeleine, les périodes de faible englacement correspondent à des périodes marquées par la réduction des largeurs de plage et subséquemment au recul du trait de côte. Les travaux de BaMasoud et Byrne (2012), aussi réalisés à partir d'orthophotographies aériennes, ont permis de mesurer l'effet d'une année de faible englacement sur l'évolution de la ligne de rivage d'un site d'étude situé dans les Grands Lacs.

Les conséquences de la réduction de la couverture de glace sur la vitesse d'érosion de la côte et sur le bilan sédimentaire des plages n'ont donc pratiquement jamais fait l'objet de quantification. Seuls quelques chercheurs ont réalisé des profils topographiques de plage (Bouchard 1997; Ross 1988) et particulièrement dans la région de Sept-Îles (Lessard et Dubois 1984; Moign 1972). Toutefois, la faible résolution temporelle et spatiale fait en sorte qu'il est difficile de faire le lien quantitatif entre l'évolution de la plage et l'évolution de la côte et d'identifier les causes de la variabilité morphologique de la plage. En l'absence de ces connaissances, les projections d'érosion côtière ne tiennent pas compte de la réduction appréhendée de la couverture de glace.

## 1.2. Objectifs du projet

L'objectif principal du projet de recherche est de décrire, comprendre et quantifier l'effet de la réduction de l'état d'englacement des estrans de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent sur la dynamique des côtes qui sont principalement sensibles aux effets des agents hydrodynamiques (côtes sablonneuses, falaises de grès).

Actuellement, les projections d'évolution côtière ne tiennent pas compte de la réduction appréhendée de la couverture de glace côtière et du changement anticipé de la durée d'exposition de la côte et des infrastructures aux vagues. Il s'agit de fournir les connaissances scientifiques nécessaires pour améliorer les projections d'évolution côtière pour quantifier le risque d'érosion des infrastructures routières de l'Est du Québec dans un contexte de changements climatiques. Ces résultats pourront servir à développer des solutions et des stratégies d'adaptation qui tiennent compte de la diminution anticipée de l'englacement et ainsi, assurer une gestion durable du réseau routier et des infrastructures côtières.

Les objectifs spécifiques du projet de recherche sont :

- Développer et appliquer des relations empiriques permettant de reconstituer de manière rétrospective (1981-2010) et prospective (2041-2070) l'évolution de l'état d'englacement des sites d'étude dans le contexte des changements climatiques.
- Évaluer l'influence de l'état d'englacement du haut estran sur la vitesse de déplacement du trait de côte/ligne de rivage (2000-2015).
- 3) Estimer l'ampleur du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison de la réduction du couvert de glace côtière pour l'horizon 2041-2070 et cartographier les secteurs en bordure des infrastructures routières où les vitesses d'érosion des littoraux devraient augmenter.
- 4) Identifier les caractéristiques géographiques, géomorphologiques, morphosédimentaires ainsi que les conditions météo-marines et les facteurs anthropiques qui favorisent ou non le développement et le maintien de la glace côtière.

# 2. MÉTHODOLOGIE

Les sous-sections suivantes décrivent la méthodologie développée pour répondre aux objectifs du projet de même que les détails méthodologiques concernant les modèles et les simulations ayant été utilisés.

# 2.1. Éléments méthodologiques relatifs au premier objectif spécifique

Le premier objectif spécifique de ce projet de recherche est de développer et appliquer des relations empiriques permettant de reconstituer de manière rétrospective (1981-2010) et prospective (2041-2070) l'évolution de l'état d'englacement des sites d'études dans le contexte des changements climatiques.

Contrairement à la glace de mer, il n'existe aucun modèle physique capable de reproduire ou de projeter les conditions d'englacement de l'estran. En conséquence, pour atteindre cet objectif, nous avons développé des relations empiriques (section 2.1.2) à partir des séries temporelles d'observations réalisées entre 2008 et 2015 et issues des suivis par caméras (section 2.1.1) de même que des données environnementales produites par la simulation réaliste MOR-NARR/GEM (section 2.5.1). Ce sont, en général, quatre relations empiriques par site témoin qui ont été construites pour reproduire les observations de concentration et d'épaisseur de glace sur le haut et le bas estran. Ces relations empiriques ont ensuite été appliquées à 3 simulations climatiques (MOR-AEV bTq, MOR-AHJ et MOR-BBHI) (section 2.5.2) afin d'obtenir l'état d'englacement de l'estran pour la période du passé récent (1981-2010) et de l'horizon 2055 (2041-2070). Les sorties (concentration et épaisseur de glace) sont utilisées pour générer l'indice de protection horizontale et verticale sur le haut estran et l'indice de protection générale sur le bas estran (section 2.2.3.1). Le calcul des tendances sur ces sorties permet de répondre au premier objectif spécifique (section 2.1.4). Afin de compléter ce portrait de l'évolution des conditions glacielles, une analyse de l'évolution du climat de vagues entre le passé récent (1981-2010) et l'horizon (2041-2070) a également été conduite. La figure 1 présente l'organigramme méthodologique menant à l'atteinte de l'objectif 1.
#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES



Figure 1. Organigramme méthodologique pour l'atteinte de l'objectif 1

## 2.1.1. Production des séries temporelles de l'état d'englacement de l'estran à l'aide des images des caméras de suivis côtiers

Un grand nombre d'informations, notamment l'état d'englacement, est tiré des photographies acquises toutes les 15, 30 ou 60 minutes selon les périodes et les sites à partir des caméras Reconyx PC85-3,1 mégapixel implantées sur les sites témoins (figure 2). Les photos ainsi acquises permettent, dans la plupart des cas, d'identifier et de localiser les principales limites géomorphologiques nécessaires à la caractérisation de l'état d'englacement du haut et du bas estran (figure 3). L'analyse de ces photos a été réalisée à partir du gratuiciel Virtual Dub 1.9.11 (année 2010). Ce logiciel de montage vidéo permet la juxtaposition des photographies l'une à la suite de l'autre à la manière d'un vidéo continu.



Figure 2. Caméras de suivis côtiers



Tiré de Bernatchez et Drejza (2015)

Les images des caméras de suivi ont aussi été utilisées pour caractériser à l'échelle quotidienne l'état d'englacement du haut et du bas estran en termes d'épaisseur et de concentration. La concentration de glace est quantifiée en pourcentage selon une résolution de 10 %. Quant au développement vertical (épaisseur), qui est non quantifiable à partir des photographies, une caractérisation qualitative ordinale a été retenue. Il s'agit des descriptifs (indice) : nul (0), pellicule (1), couche de glace (2), glace mince (3), glace moyenne (4) et glace épaisse ou très épaisse (5). Le développement vertical allant de nul (0) à pellicule (1), puis de pellicule (1) à couche (2) et enfin de couche (2) à glace mince (3) est assez aisé. Par contre, la transition entre une glace mince (3) vers une glace épaisse (4) est plus difficile à observer en raison d'une part, de l'absence de point de repère sur des images dominées par la couleur blanche et d'autre part en raison de la croissance verticale s'effectuant aussi à la base de la glace qui elle est tout simplement non détectable à l'aide des photographies. Les descriptifs de glace épaisse (4),

Figure 3. Limites géomorphologiques observées pour une côte basse végétalisée (exemple de Saint-Ulric)

mais surtout de glace très épaisse (5) ont donc été principalement utilisés lorsqu'il y avait des empilements de glace. Lorsque la visibilité est d'une qualité insuffisante pour permettre cette caractérisation, les descriptifs sont réduits à nul, partiel et élevé et pour éviter toute confusion, ils sont chiffrés 0, 500 et 1000.

Au total, pour réaliser les séries temporelles des 13 sites témoins (16 segments d'analyse), ce sont plus de 50 000 jours qui ont été visionnés et caractérisés pour une période totale de plus de 20 000 jours (date) couverts. Le tableau 1 présente ces chiffres de manière détaillée et la figure 4 montre la couverture temporelle pour chacune des caméras. C'est ainsi 63 saisons glacielles qui ont pu être caractérisées totalement ou presque totalement sur l'ensemble de la période 2008-2015 pour les 13 sites témoins.

Région	Site témoin	Nombres de séries temporelles/ caméras	Nombre de jours visionnés	Nombres de jours couverts par au moins une caméra
	Baie-Saint-Ludger	3	2 645	1 479
	Pointe-Lebel	4	3 984	2 164
Côte-Nord	Rivière-Pentecôte	5	4 529	1 278
	Rivière-Saint-Jean	7	3 083	1 818
	Longue-Pointe-de- Mingan	11	5 357	1 283
	Saint-Ulric	3	3 930	1 386
	Rivière-à-Claude	3	1 755	1 301
O a an í ai a	Penouille	5	8 222	1 905
Gaspesie	Chandler	1	1 177	1 177
	Pointe-Verte	1	1 273	1 273
	Maria	2	2 548	1 274
Îles-de-la-	La Martinique	4	6 409	2 121
Madeleine	Pointe-aux-Loups	3	5 359	2 296
TOTAL		52	50 271	20 755

# Tableau 1. Nombre de jours visionnés et caractérisés et nombre de jours couverts correspondants



Figure 4. Couverture temporelle des caméras de suivi, les séries en gris n'ont pas été retenues au final pour le développement des relations empiriques

### 2.1.1.1. Saisons glacielles ayant été suivies : 2008 à 2015

Les observations sur l'état d'englacement du haut et du bas estran disponibles dans le cadre de ce projet sont comprises entre 2008 et 2015. Cette période 2008-2015 présente un large éventail de conditions climatiques qui s'avère idéal à l'atteinte des objectifs de ce projet de recherche. On compte trois années d'observations où la couverture de glace de mer à l'échelle de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent a été près ou supérieure à la normale (moyenne 1980-2010) (2008-2009, 2013-2014 et 2014-2015) et quatre années où la couverture de glace a été inférieure à la normale (2011-2012 et 2012-2013) dont deux où des minimums historiques ont été enregistrés (2009-2010 et 2010-2011) (figure 5). Le tableau A 1, à l'annexe A, présente en détail les années suivies pour chacun des sites témoins, et ce, en fonction du nombre d'années « chaudes » et d'années « froides ».



Figure 5. Concentration totale hebdomadaire (%) de glace de mer dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent pour les années de suivis par caméras

### 2.1.1.2. Regroupement des caméras

Les relations empiriques d'épaisseur et de concentration ont été développées à partir de la moyenne des observations (caméras) lorsque le site était suivi par plus d'une caméra. En effet, il n'était pas souhaitable de développer une relation empirique pour chacune des caméras implantées sur un même site d'étude. Par exemple, une seule relation empirique a été développée à l'aide des moyennes des observations des trois caméras pour le site de Saint-Ulric. Moyenner les observations de plusieurs caméras permet d'éviter de chercher à reproduire des variations très locales de glace, mais aussi de combler les trous dans les séries temporelles (par exemple, une caméra est obstruée par la neige alors que deux autres ne le sont pas). Avant de faire les regroupements, les conditions géographiques et géomorphologiques doivent avoir été jugées similaires entre les caméras. Afin de vérifier si les observations étaient similaires entre les caméras et qu'il était cohérent d'en tirer une moyenne (regroupement), les coefficients de détermination (R<sup>2</sup>) et l'erreur type ont été calculés sur la concentration de glace du haut estran entre le 1<sup>er</sup> novembre et 31 mai. Le tableau A 2 à l'annexe B présente les regroupements de caméras pour chacun des sites témoin de même que les résultats des coefficients de détermination (R<sup>2</sup>) obtenus entre ces caméras.

### 2.1.2. Élaboration des relations empiriques

Les relations empiriques qui tendent à reproduire les observations de l'état d'englacement du haut/bas estran obtenues à l'aide des caméras Reconyx sont construites à l'aide de champs simulés par le modèle réaliste MOR-GEM ayant une résolution de 5 km. Les variables environnementales utilisées afin de reproduire empiriquement les conditions de glace d'estran sont présentées à la figure 6. Les champs qui ont été utilisés dans la construction des relations empiriques sont :

- L'épaisseur de glace de mer : épaisseur de la glace obtenue en répartissant le volume de glace d'une cellule du simulateur uniformément sur cette cellule.
- La concentration de glace de mer : fraction d'une cellule du simulateur qui est couverte de glace.
- Les degrés-heure de gel : le calcul des degrés-heure de gel s'effectue ici à partir du 1er octobre de chaque année, lorsque la température est sous le point de congélation, elle est cumulée, aux heures, en valeur absolue. Ce cumul est remis à zéro chaque 1er octobre.

• Les degrés-heure de dégel : le calcul des degrés-heure de dégel s'effectue ici à partir du 1er janvier de chaque année, lorsque la température est au-dessus du point de congélation, elle est cumulée, aux heures. Ce cumul est remis à zéro chaque 1er janvier.

Les cellules du modèle d'où les séries temporelles des variables environnementales ont été extraites ont été choisies en comparant plusieurs cellules autour des sites d'observations. Une seule cellule par site a été choisie à l'exception du site de La Martinique où deux cellules ont été choisies. Les cellules ont été choisies de façon à représenter le mieux possible les conditions de pied de glace de bas estran des sites en question. Les coordonnées des cellules sont présentées au tableau A 3 à l'annexe C.

Une relation empirique est spécifiquement construite pour l'épaisseur de glace (valeurs entre 0 et 5 qui décrivent l'épaisseur du pied de glace) et la concentration de la glace (% de couverture) sur le haut estran et selon le cas, sur le bas estran pour un total de 4 relations empiriques, et ce, pour chaque site témoin à l'exception des sites des Îles-de-la-Madeleine, La Martinique et Pointe-aux-Loups, où il n'y a pas de pied de glace de bas estran.



Figure 6. Exemple de variables environnementales utilisées dans la création des relations empiriques de Baie-Saint-Ludger accompagnées du signal de développement vertical de bas estran à reproduire. (a) Indice de développement vertical tiré des photographies, (b) épaisseur de glace de mer, (c) concentration de glace de mer, (d) degrés-heure de gel et (e) degrés-heure de dégel.

# 2.1.3. État d'englacement de l'estran (niveau de développement du pied de glace

Pour décrire l'état d'englacement du haut et du bas estran durant l'intervalle 1981-2070, les données simulées de concentration (0-100 %) et d'épaisseur (indice de 0 à 5) de glace sur le haut et le bas estran doivent être intégrées en une donnée unique (catégorie) ; la concentration et l'épaisseur de la glace, considérées seules, ne permettent pas de décrire l'état d'englacement de l'estran. Les tableaux suivants présentent les conditions de concentration et d'épaisseur de glace associées à chaque catégorie d'état d'englacement (libre, présence de glace, incomplet et complet) pour le haut estran (tableau 2) et le bas estran (tableau 3).

Pour le haut estran, notons que le tableau 2 réfère à la zone de formation « régulière » du pied de glace. Il s'agit de la zone, exprimée en pourcentage de couverture sur le haut estran à partir de la flexure, où le pied de glace de haut estran s'établit. Par exemple, pour le site de Rivière Pentecôte, il a été évalué que la zone de formation « régulière » du pied de glace de haut estran couvre 30 % du haut estran à partir de la flexure. L'annexe D présente la démarche de même que les données ayant permis de déterminer l'étendue des zones de formation « régulière » du pied de glace de haut estran (%) pour chacun des sites. La figure 7, complémentaire au tableau 2, illustre les divisions sur le haut estran.

Catégorie	Description	Concentration (%)	Epaisseur (indice)
Libre	ll n'y a pas de glace.	0	0
Présence de glace	Il y a de la glace sur l'estran mais elle n'est pas présente en quantité suffisante pour que l'on puisse la qualifier de pied de glace incomplet ou complet.	>0 <=100	<3
Incomplet	La glace recouvre plus de ¼ et moins de ¾ de la de la zone de formation régulière du pied de glace de haut estran et l'épaisseur de la glace est de 3 et plus.	>¼ de la zfrpg* <¾ de la zfrpg*	>3
Complet	La glace recouvre ¾ et plus de la zone de formation régulière du pied de glace de haut estran et l'épaisseur de la glace est de 3 et plus.	>¾ de la zfrpg*	>3

		,					
Tableass	<b>^</b>	Fint .			<b>.</b>	h 4	
Lableau	/	FIAT (	rendia	cement	an	naur	estran
labioaa	_	-core -	a ongia		~~	maar	0001011

\*zfrpdg : Zone de formation régulière du pied de glace



Figure 7. Division du haut estran pour la conversion des données de concentration et d'épaisseur de glace en indices de protection (sur le schéma, la zone normale de formation du pied de glace de haut estran est de 50 %)

Catégorie	Description	Concentration (%)	Epaisseur (indice)
Libre	ll n'y a pas de glace	0	0
Présence de glace	Il y a de la glace sur l'estran mais elle n'est pas présente en quantité (concentration et épaisseur) pour que l'on puisse la qualifié de pied de glace incomplet ou complet.	>0 <=100	<3
Incomplet	L'épaisseur de la glace est de 3 et plus et la glace recouvre moins de 50 % du bas estran	< 50	>3
Complet	L'épaisseur de la glace est de 3 et plus et la glace recouvre 50 % et plus du bas estran	>=50	>3
Complet consécutif	<ul> <li>Nous avons observé qu'un englacement dit « complet » sur le bas estran est parfois lié au mouvement de la glace de mer. En effet même si glace recouvre, par exemple, 100 % du bas estran (épaisseur de 3 et plus), cela ne signifie pas qu'il s'agit d'un pied de glace de bas estran répondant à la définition de celui-ci. Le pied de glace de bas estran se soulève à marée haute, s'échoue à marée basse et ses glaces ne se déplacement pratiquement pas horizontalement.</li> <li>Un englacement « complet » doit perdurer au moins 5 jours consécutifs pour figurer dans cette catégorie.</li> </ul>	>=50	>3

#### Tableau 3. État d'englacement du bas estran

## 2.1.4. Tendances : passé récent (1981-2010) et horizon 2055 (2041-2070)

Les relations empiriques construites à l'aide de la simulation réaliste MOR-NARR/GEM ont été appliquées aux résultats des trois simulations climatiques (MOR-AHJ, MOR-AEV bTq, MOR-BBHI), ce qui nous permet de simuler l'état d'englacement et le niveau de protection verticale offert par la glace pour le passé récent (1981-2010) de même que de réaliser des projections pour l'horizon 2055 (2041-2070) et d'en quantifier l'évolution, et ce, devant 16 segments d'analyse. Les résultats des trois simulations ont été moyennés afin d'obtenir une situation probable de l'état d'englacement du haut et du bas estran pour le passé récent et pour l'horizon 2055. Enfin, notons que les données d'englacement du haut/bas estran du passé récent (1981-2010) sont considérées comme une « normale probable ».

Les comparaisons entre le passé récent et l'horizon 2055 porte sur :

- La saison glacielle (date de début, date de fin, durée en nombre de jours)
- L'état d'englacement du haut estran (nombre de jours, libre (dans la saison glacielle), présence, incomplet, complet)
- L'état d'englacement du bas estran (nombre de jours, libre (dans la saison glacielle), présence, incomplet, complet)
- Le niveau de protection verticale à la côte offert par le pied de glace de haut estran et de bas estran (protection intégrée)

À l'image de l'analyse des tendances d'englacement, les tendances du climat de vagues ont elles aussi été calculées. Les données de vagues utilisées dans le cadre de ce projet pour le futur sont celles produites à partir du modèle WaveWatchIII forcé par la simulation MOR-BBHI. Il s'agit ici d'une évaluation sommaire des modifications des hauteurs de vagues (en fonction des directions/angle d'incidence) entre le passé récent (1981-2010) et l'horizon 2050 (2041-270).

# 2.2. Éléments méthodologiques relatifs au deuxième objectif spécifique

Le deuxième objectif spécifique de ce projet de recherche est d'évaluer l'influence de l'état d'englacement du haut estran sur la vitesse de déplacement du trait de côte/ligne de rivage pour la période 2000-2015.

Sur les côtes basses sablonneuses, l'évolution littorale est en grande partie influencée par les conditions hydrodynamiques. Plus spécifiquement, l'érosion latérale (recul) est attribuable, presque exclusivement, à l'impact des vagues. Ainsi, pour répondre à l'objectif, il est nécessaire de mettre en relation l'évolution de la ligne de rivage (section 2.2.1) avec les conditions de vagues (section 2.2.2), et ce, en intégrant l'état d'englacement de l'estran (section 2.2.3).

Pour combler le manque d'observations sur la glace de haut et bas estran et sur les vagues, ce sont les données issues de simulations réalistes (section 2.5) qui ont été utilisées pour répondre à cet objectif. Les données de glace d'estran et de vagues ont été générées pour toute la période 2000-2015. La figure 8 présente l'organigramme méthodologique menant à l'atteinte de l'objectif 2.



Figure 8. Organigramme méthodologique pour l'atteinte de l'objectif 2

# 2.2.1. Vitesses de déplacement de la ligne de rivage/trait de côte

Pour obtenir la vitesse de déplacement du trait de côte/ligne de rivage au cours de la période 2000-2015, les données du réseau de stations de suivi du LDGIZC ont été utilisées (Bernatchez et Drejza, 2015). Pour pouvoir utiliser les données de manière adéquate, il a été nécessaire d'identifier un ou plusieurs segments d'analyse pour chacun des sites témoins. Les segments d'analyse sont localisés à l'intérieur d'une seule cellule ou unité hydrosédimentaire, selon le cas. Ils sont globalement caractérisés par le même type de côte que celui qui est visible sur les photographies des caméras de suivi. Aussi, la côte ne doit pas présenter de variations significatives des caractéristiques géographiques et géomorphologiques. C'est à l'intérieur du haut estran, les données de niveaux d'eau et de vagues de même que les données d'évolution du trait de côte/ligne de rivage doivent être considérées. On compte au total 16 segments d'analyse (13 sites témoins). Seuls les sites de Penouille et de Longue-Pointe-de-Mingan comptent plus d'un segment d'analyse.

Pour chaque segment d'analyse, les mesures de recul telles que relevées à l'aide des bornes du réseau de suivi du LDGIZC (annexe E) sont moyennées pour obtenir la moyenne des valeurs négatives (recul moyen annuel). Les valeurs d'accumulation ne sont pas prises en compte puisque pour l'instant il s'agit de quantifier l'effet de protection de la glace d'estran sur le recul du trait de côte, et non pas de vérifier si la glace d'estran contribue ou non à l'accrétion des côtes. Les valeurs positives de déplacement correspondent donc à 0 m de déplacement négatif. Ces déplacements nuls (0 m) sont inclus dans le calcul des moyennes.

# 2.2.2. Conditions hydrodynamiques 2000-2015 (simulation réaliste)

Les données de vagues et de niveau d'eau ont été générées pour la période 2000-2015. Le niveau d'eau<sup>1</sup> (hauteur dynamique, marée et empilement par le vent) pour la période 2000-2015 est produit à l'aide de la simulation réaliste MOR-GEM. Les données de vagues 2000-2015 quant à elles ont été produites avec le modèle WaveWatch III et la simulation réaliste

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> La surcote barométrique n'est pas incluse dans le niveau d'eau simulé. Plusieurs tests ont été conduits pour intégrer l'effet de surcote barométrique au niveau d'eau, mais ceux-ci n'ont pas été concluants.

MOR-NARR/GEM<sup>2</sup> sur une base horaire. Plus exactement, les données sont produites avec les forçages NARR entre 2000 et 2010 puis avec les forçages de GEM entre 2010 et 2015 et CFSR pour les vents 2000-2015. Rappelons que les données de vagues incluent l'effet d'atténuation par les glaces (MOR couplé CICE5). Les données de vagues proviennent du projet MODESCO (Bernatchez et al., 2017). Il est important de spécifier que ce sont les données de vagues au large (hauteur et la longueur d'onde, H<sub>0</sub> et L<sub>0</sub> respectivement) qui ont été utilisées puisque le calcul du runup s'effectue à partir de vagues au large et non à partir de vagues sont présentées à l'annexe F. Ces données permettent de calculer le niveau d'eau total à la côte (NETC) pour la période 2000-2015.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Une simulation conduite entièrement à partir de MOR-GEM n'était pas disponible pour des questions de logistiques (espace et temps de calcul).

### 2.2.2.2. Niveau d'eau total à la côte (NETC)

Les conditions hydrodynamiques qui influencent le déplacement de la ligne de rivage sont caractérisées à l'aide du niveau d'eau total à la côte (NETC). Celui-ci correspond au niveau d'eau auquel on additionne les conditions de vagues grâce au calcul du runup (figure 9). Le runup combine à la fois les caractéristiques des vagues et les caractéristiques du haut estran, notamment la pente. Le niveau d'eau total à la côte est illustré à la figure 9 et résumé par l'équation suivante :



Modifié de Cariolet, 2011 par Didier 2014

Figure 9. Schéma des composantes nécessaires pour le calcul du niveau d'eau total à la côte

### Calcul du runup

Il existe différentes équations empiriques pour le calcul du runup (Holman, 1986 par exemple), mais nous avons retenu celle de Sockdon et al. (2006) dans le cadre de ce projet. La paramétrisation de l'équation de runup par ces auteurs est valable pour les plages réflectives, intermédiaires et dissipatives. L'équation est la suivante :

$$R_{2\%} = 1,1(0.35tan\beta(H_0 L_0)^{1/2} + \frac{[H_0 L_0 (0.563tan\beta^2 + 0.004)]^{1/2}}{2}$$

Où tan $\beta$  représente la pente de l'estran,  $H_0$  et  $L_0$ , la hauteur significative et la longueur d'onde des vagues au large respectivement. Les variables comprises dans les trois équations de runup sont décrites ici. La longueur d'onde au large est calculée à partir de l'équation suivante :

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$$

Où g représente l'accélération gravitationnelle (9,81 m/s) et T la période des vagues au large.

Le calcul du runup implique également de connaître la pente de la plage. La mesure de la pente à partir de différents critères fait l'objet d'études dans la littérature scientifique (voir Didier, 2014). Dans le cadre de ce projet, les pentes du haut estran sont mesurées entre la flexure et la ligne de rivage à partir de l'équation suivante :

$$tan\beta = \frac{Z_{LR} - L_{flex}}{largeur \, du \, haut \, estran} \times 100$$

Où  $Z_{LR}$  est l'attitude de la ligne de rivage et où  $Z_{flex}$  est l'altitude de la flexure. Les pentes seront mesurées directement devant les bornes, mais aussi à tous les 50 mètres le long du segment d'analyse.

# 2.2.3. Modèle théorique : indice de protection offert par la glace 2000-2015 (simulation réaliste)

Une des étapes menant à l'atteinte du deuxième objectif spécifique a été de produire les concentrations et épaisseurs de glace du haut estran et du bas estran pour 2000-2015 à l'aide des relations empiriques et d'une simulation réaliste, dans ce cas la simulation MOR-GEM. Les séries temporelles de glace de haut et bas estran (concentration et épaisseur de glace) ont été converties en indice de protection. Ces séries sur l'état d'englacement de l'estran, conjuguées aux séries temporelles de vagues et de niveaux d'eau, ont permis de définir si les conditions hydrodynamiques ont été *effectives* ou non. Rappelons qu'il est établi que les conditions hydrodynamiques ne peuvent affecter le déplacement de la ligne de rivage/trait de côte lorsque le pied de glace est suffisamment développé verticalement. Pour cet objectif spécifique, c'est l'indice de protection intégrée (maximum de : indice de protection verticale sur le haut estran et indice de protection générale sur le bas estran) qui permet de définir si les conditions hydrodynamiques sont effectives ou non.

# 2.2.3.1. Indice de protection: contre l'érosion latérale par les agents hydrodynamiques

Contrairement à ce qui est décrit à la section 2.1.3, il ne s'agit pas de décrire ici l'état d'englacement du haut estran et du bas estran, mais bien de décrire le niveau de protection verticale (protection contre l'érosion latérale offerte par le pied de glace) du pied de glace.

Pour décrire le <u>niveau de protection verticale assurée</u> par la formation de glace de haut et de bas estran durant l'intervalle 1981-2070, les données simulées de concentration (0-100 %) et d'épaisseur (indice de 0 à 5) de glace sur le haut et le bas estran doivent être intégrées en une donnée unique. Celles-ci ont été converties en indice de protection verticale pour le haut estran (section 2.2.3.2) et en un indice général pour le bas estran (section 2.2.3.3).

Il est à noter qu'un indice de protection horizontale sur le haut estran a aussi été développé. Celui-ci permet de décrire l'influence de la glace sur la dynamique du transport sédimentaire. Celui-ci n'a cependant pas été utilisé dans le cadre de ce projet. L'impact de la glace de haut estran et de bas estran sur la dynamique sédimentaire constitue une problématique de recherche à part entière.

### 2.2.3.2. Indice de protection verticale sur le haut estran

L'élaboration de l'indice de protection verticale sur le haut estran s'appuie sur le rehaussement topographique de la plage occasionné par l'accumulation de glace sur le haut estran. Quand la couche de glace est très mince, elle ne limite pas le contact entre les agents hydrodynamiques sur la composante verticale de la côte (hauteur entre D<sub>min</sub> et D<sub>max</sub>), et ce, peu importe sa concentration. Puis, quand elle s'épaissit, elle rehausse la plage, elle en modifie la topographie jusqu'à ce que l'eau ne puisse plus progresser aussi loin sur la plage. En ce sens, un niveau d'eau donné qui pourrait atteindre le D<sub>min</sub> de la côte (figure 10) en l'absence de glace et occasionner de l'érosion ne le pourrait plus en raison du rehaussement de la plage par la glace. A titre d'exemple, la figure 11 présente le profil du pied de glace lors du levé de mars 2014 près du km-repère 4,4 à Longue-Pointe-de-Mingan (Corriveau et al., 2016), et permet de visualiser le développement vertical de la glace. Sur ces profils, un niveau d'eau de 2 m aurait monté sur une distance d'environ 40 m à partir de la flexure en l'absence de pied de glace. Par contre, en raison de l'englacement du haut estran, le niveau d'eau de 2 m progresse sur une distance d'environ 25 m à partir de la flexure vers la côte. Quand le pied de glace est bien développé verticalement, la marée monte et descend au front de celui-ci; la distance sur laquelle l'eau monte à partir de la flexure (si front du pied de glace à la flexure) est alors de 0 m.



Figure 10. Localisation de la limite  $D_{\text{min}}$  le long d'un profil de plage avec terrasse de plage en érosion



\*Tiré de Corriveau et al., 2016

Figure 11. Protection de la côte grâce au rehaussement topographique par la glace : profil du pied de glace de haut estran, à proximité du km-repère 4,40, lors des levés de décembre 2013 et de mars 2014, Longue-Pointe-de-Mingan

Ainsi, dans le cas du rôle de protection contre l'érosion, c'est principalement l'épaisseur de la glace qui permet de définir l'indice de protection verticale. En effet, que la glace occupe ¼ ou la totalité de la zone de formation « régulière » du pied de glace haut estran, si elle est suffisamment développée verticalement (en épaisseur), celle-ci limite le contact entre les agents hydrodynamiques et la falaise ou la microfalaise et constitue alors un rempart contre l'érosion du littoral par ces agents. Les différentes valeurs que peuvent prendre les indices de protection verticale sur le haut estran sont comprises entre 0 et 1 et sont présentées au tableau 4. Ces valeurs sont attribuées en fonction de la concentration et de l'épaisseur de la glace de haut estran (exemple au tableau 5). Ce tableau de conversion varie en fonction des sites témoins. Bref, les indices de protection permettent de connaître, en nombre de jours par saison, le niveau de protection offert par la glace de haut estran contre l'assaut des agents hydrodynamiques et l'érosion latérale qu'ils peuvent générer.

Code numérique	Descriptif qualitatif	Définition	
0	Nul	Le haut estran est libre de glace.	
0,25	Faible	Il y a de la glace sur le haut estran, mais elle n'offre que peu ou pas de protection contre les agents hydrodynamiques. Verticalement, la glace ne limite presqu pas la progression de la marée.	
0,5	Partiel	Il y a de la glace sur le haut estran et elle assure une protection verticale contre les agents hydrodynamiques, mais seulement partiellement. La glace influence donc la dynamique du haut estran sans toutefois assurer une protection contre l'érosion latérale. Verticalement, la formation glacielle peut encore être submergée par la marée, et ce, assez régulièrement.	
0,75	Élevé	La glace est suffisamment développée sur le haut estran pour limiter presque complètement l'effet des agents hydrodynamiques à la côte. Verticalement, presque aucune marée ne la submerge.	
1	Complet	La glace est suffisamment développée sur le haut estran pour limiter complètement l'effet des agents hydrodynamiques à la côte.	

#### Tableau 4. Définitions de l'indice de protection verticale sur le haut estran

# Tableau 5. Exemple de tableau de conversion pour établir l'indice de protection verticale sur le haut estran

Concentration (%)/ Épaisseur (indice)	0 à 1/4*zpdg <sup>1</sup>	1/4*zpdg à 1/2*zpdg	1/2*zpdg à 3/4*zpdg	3/4*zpdg à 1*zpdg	1*zpdg à 1*zpdg +zpdg nivale
0à1	0	0	0	0	0
1 à 1,5	0	0	0	0	0
1,5 à 2	0	0,25	0,25	0,25	0,25
2 à 2,5	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5
2,5 à 3	0,5	0,75	0,75	0,75	1
3 et plus	1	1	1	1	1

<sup>1</sup> zpdg, pour « zone de pied de glace » correspond à la zone de formation régulière du pied de glace

### 2.2.3.3. Indice de protection générale sur le bas estran

Les différentes valeurs que peuvent prendre les indices de protection générale sur le bas estran sont présentées au tableau 6. Ces valeurs sont attribuées en fonction de la concentration et de l'épaisseur de glace de haut estran (exemple au tableau 7). Lorsque l'épaisseur de la glace est faible (indice de développement entre 0 et 2), on considère que celle-ci, peu importe la concentration, ne permet pas du tout d'assurer la protection du haut estran ou du pied de glace de haut estran; la glace étant encore trop mince pour résister aux vagues. Puis, lorsque la glace atteint une épaisseur de 2 ou plus, l'effet de protection varie entre 0,25 et 1. Dans le cas du pied de glace de bas estran, nous avons observé (caméras de suivi) que même s'il ne couvre pas 100 % (concentration) du bas estran, il est en mesure d'assurer un niveau élevé (indice élevé) de protection. Ainsi, avec une couverture entre 20 % et 40 % par exemple et une glace suffisamment développée (3 et plus), l'indice de protection attribuée est de 1, c'est-à-dire que nous considérons que sous ces conditions, le pied de glace de bas estran assure une protection complète du haut estran ou du pied de glace de haut estran contre les vagues. En ce sens, l'état d'englacement du bas estran peut donc être incomplet, mais l'entité glacielle peut offrir un niveau de protection élevé ou complet.

Code numérique	Descriptif qualitatif	Définition		
0	Nul	Le bas estran est libre de glace.		
0,25	Faible	Il y a de la glace sur le bas estran, mais elle n'offre que peu ou pas de protection contre les agents hydrodynamiques.		
0,5	Partiel	Il y a de la glace sur le bas estran, mais elle assure une protection seulement partielle contre les agents hydrodynamiques.		
0,75	Élevé	La glace est suffisamment développée sur le bas estran pour limiter presque complètement l'effet des agents hydrodynamiques.		
1	Complet	La glace est suffisamment développée sur le bas estran pour limiter complètement l'effet des agents hydrodynamiques sur la côte.		

Tableau 6. Définitions de l'indice de protection sur le bas estran

Concentration (%)/ Épaisseur (indice)	0-10 %	0-20 %	20-40 %	40-60 %	60-80 %	80-100 %
0à1	0	0	0	0	0	0
1 à 1,5	0	0	0	0	0	0
1,5 à 2	0	0	0	0	0	0
2 à 2,5	0	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5
2,5 à 3	0,25	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75
3 et plus	0,25	0,75	1	1	1	1

Tableau 7. Indice de protection sur le bas estran

### 2.2.3.4. Indice de protection

L'indice qui sera utilisé pour la réalisation de cet objectif est l'indice le plus élevé entre l'indice général du bas estran et l'indice du haut estran (indice de protection intégrée). Par exemple, dans le cas où l'indice de protection verticale sur le haut estran est de 0,25 et l'indice de protection générale sur le bas estran, de 0,75, l'indice de protection intégrée est de 0,75 (maximum des deux valeurs). En effet, même si la glace de haut estran est très peu abondante, la glace de bas estran stoppera les vagues avant qu'elles ne puissent atteindre le haut estran ou occasionner de l'érosion à la côte. Cet indice est simplement nommé « indice de protection » ou « niveau de protection » dans les sections suivantes.

## 2.2.4. Relations entre l'état d'englacement et la vitesse de déplacement du trait de côte ou ligne de rivage

Une fois les séries temporelles de niveaux d'eau total effectifs à la côte (NETC\_effectif) réalisées (résolution horaire), ces niveaux sont mis en relation avec les mesures de déplacements négatifs mesurés à la côte.

Cette approche a été développée sur la base des résultats de Ruggierro et al. (2001), Sallenger (2002), Swenson et al. (2006) et Brown et al. (2005) qui ont trouvé des relations positives entre le recul des côtes et les conditions hydrodynamiques générant des évènements de contacts. Plus exactement, Sallenger et al. (2002) ont déjà observé qu'il existait une relation positive entre le nombre d'heures de contact (nombre d'heures où le niveau d'eau total à la côte (NETC) est supérieur au D<sub>min</sub>) et l'évolution de la ligne de rivage/trait de côte ( $R^2 = 0.56$ ) (figure 12). Dans le cas de Swenson et al., (2006) certaines des relations entre le taux de recul des falaises sur les rives du lac Supérieur et les contacts présentent des R<sup>2</sup> allant jusqu'à 0,74 et 0,75. Quant à Brown et al. (2005), ils observent que les taux de reculs des falaises à l'échelle d'intervalles historiques suivent l'évolution de la hauteur d'impact des vagues (moyenne annuelle des maximums mensuels). Bref, toutes ces études ont trouvé une corrélation entre les agents hydrodynamiques et l'évolution du trait de côte/ligne de rivage. Il s'agit du seul moyen possible, à la lumière de nos connaissances, pour déterminer rétroactivement l'influence de la glace sur le déplacement du trait de côte durant l'intervalle 2000-2015.

La figure suivante, adaptée de Sallenger (2000) et Stéphan (2011) par Didier (2014), présente le modèle conceptuel d'érosion et de submersion sur laquelle nous nous basons (figure 12). Bien que cette figure présente trois régimes de contact, c'est uniquement le nombre d'heures de contact (peu importe le régime) qui est quantifié dans le cadre de ce projet. Ainsi, l'approche de base consiste simplement à calculer le nombre d'heures où le NETC effectif dépasse un seuil altitudinal. Ce calcul s'effectue entre les dates de mesures des bornes (mesures quasi annuelles d'un été à l'été suivant). Différentes valeurs de seuil, à tous les 0,05 m, ont été testées à l'aide d'une itération dans MATLAB afin de définir un seuil optimal<sup>3</sup>. Le seuil optimal correspond à la valeur pour laquelle le R<sup>2</sup> de la relation (régression linéaire) entre le nombre d'heures a été le plus élevé.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> La valeur du seuil ne correspond pas à une valeur d'altitude en géodésique puisque les niveaux d'eau sont exprimés par rapport au niveau de référence des modèles.



Adapté de Sallenger (2000) et de Stéphan (2011) par Didier 2014

# Figure 12. Régime de contacts et impacts morphologiques du NETC sur le littoral

Une fois les meilleures relations trouvées pour chacun des sites d'études, il est possible d'évaluer l'effet de protection que la glace d'estran a offert pour chacune des années de la période 2000-2015. Par exemple, pour une année donnée, il s'agira de reconstituer son recul théorique en l'absence de glace en ajoutant les heures ayant été initialement considérées comme non effectives en raison de la protection offerte par la glace. On obtiendra donc la valeur de recul réel et théorique et la valeur de recul théorique en l'absence de glace à la côte. L'écart en pourcentage entre ces deux données correspond à l'effet de protection assurée par la glace.

Une des limites de cette approche est que les données de vagues incluent l'effet d'atténuation par la glace de mer et qu'il est impossible que le haut estran soit libre de glace alors qu'il y a de la glace de mer. En sachant cela, l'effet de protection obtenu sera sous-estimé en raison d'un climat de vagues moins énergétiques que ce qui serait observé si les données de vagues avant l'influence de la glace avaient été disponibles.

## 2.3. Éléments méthodologiques spécifiques au troisième objectif spécifique

Le troisième objectif spécifique de ce projet de recherche est d'estimer l'ampleur du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison de la réduction du couvert de glace côtière pour l'horizon 2041-2070 et de cartographier les secteurs en bordure des infrastructures routières où les vitesses d'érosion des littoraux devraient augmenter.

Lorsque les relations linéaires entre les conditions hydrodynamiques et les conditions d'englacement et les déplacements négatifs mesurées à la côte sont concluantes (objectif 2), il est possible de les utiliser pour estimer l'ampleur du changement de la vitesse de déplacement du littoral pour la période 1981-2070 (figure 13).



Figure 13. Organigramme méthodologique pour l'atteinte de l'objectif 3

# 2.4. Éléments méthodologiques relatifs au quatrième objectif spécifique

Le quatrième objectif spécifique de ce projet de recherche est d'identifier les caractéristiques géographiques, géomorphologiques, morphosédimentaires ainsi que les conditions météo-marines et les facteurs anthropiques qui favorisent ou non le développement et le maintien de la glace côtière.

Les données obtenues à la suite de l'atteinte des objectifs 1, 2 et 3 de même que la connaissance des caractéristiques des nombreux sites témoins contribuent à répondre à cet objectif. Il s'agit d'un objectif lié à l'analyse et l'interprétation des résultats.

# 2.5. Éléments méthodologiques relatifs aux modèles et aux simulations réalistes et climatiques

Cette étude utilise un modèle pronostique couplé océan-glace de mer soit le Modèle Océanique Régional (MOR) pour lequel le domaine s'étend de l'Île d'Orléans à l'ouest jusqu'au détroit de Belle-Isle au nord-est et au détroit de Cabot au sud-est (figure 14). Rappelons que ce projet est réalisé à l'aide d'une nouvelle version du MOR dans laquelle le modèle océanique est couplé à une version plus récente du modèle de glace de mer : CICE5. Le projet X012.1. « Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques » utilisait une version antérieure du modèle de glace de mer (CICE1).



Figure 14. Domaine du simulateur MOR

Le modèle océanique à niveaux-z fournit une solution hydrostatique pour la conservation de la masse, de la chaleur et du sel à l'aide d'un système d'équations incluant les approximations de Boussinesq et celles en eau peu profonde (Backhaus and Maier-Reimer 1983; Backhaus 1985; Stronach et al. 1993). Un schème semi-implicite résout la variation des niveaux d'eau et les transports sont corrigés à l'aide d'une technique de correction des flux (Zalesak 1979). Le modèle est complété par des équations d'énergie cinétique turbulente de niveau de fermeture 2.5 (k-eps) incluant les fonctions de stabilité de Canuto et al. (2001) et une équation diagnostique pour les échelles de mélange turbulent (parabolique et longueur d'échelle de Ozmidov).

Dans le cadre de ce projet, plusieurs simulations couplées océan-glace de mer ont été réalisées. Chacune des simulations est faite pour l'ensemble du domaine spatial et comportent donc les informations pour tous les sites témoins. Les simulations réalisées sont désignées à l'aide du préfixe MOR précédant le forçage atmosphérique utilisé (GEM, AEV bTq, AHJ et BBHI). Ces simulations sont décrites aux sous-sections suivantes.

# 2.5.1. Simulations réalistes MOR-GEM et MOR-NARR/GEM (+ vents CFSR)

La simulation MOR-GEM est la simulation la plus réaliste puisque les forçages atmosphériques utilisés sont obtenus à partir des cycles opérationnels d'analyse du modèle atmosphérique GEM (Global Environmental Multiscale) du Centre Météorologique du Canada (CMC). Il s'agit des mêmes simulations utilisées pour faire les prévisions météorologiques d'Environnement Canada.

La simulation s'étend de décembre 1996 à décembre 2014, couvrant une période de 18 ans. Cette simulation utilise une condition initiale pour la salinité et la température du GSL (golfe du Saint-Laurent) pour un état au repos et est entièrement en mode pronostique, c'est-à-dire qu'au cours des 18 ans, il n'y a aucun rappel de la salinité et de la température. Les seules contraintes externes sont : la condition initiale, les forçages atmosphériques, les rivières et les forçages océaniques tels que les marées, la salinité et la température aux frontières océaniques. À l'aide des équations de conservation et de l'équation d'état, nous prédisons, par pas de temps de 5 minutes, l'évolution du système, sans aucun mécanisme de rappel vers les observations.

MOR-GEM est la simulation de référence avec laquelle ont déjà été comparées les simulations forcées par AEV bTq et AHJ dans le cadre du projet X012.1 « Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-

Laurent dans la perspective des changements climatiques ». Cette simulation est validée à l'aide des observations disponibles. Cette validation nous permet d'avoir confiance dans la capacité de prédiction du simulateur. Il s'agit d'une étape très importante puisque les prédictions du simulateur (pour l'horizon 2055) ne peuvent être validées. Une fois validée, cette simulation de référence nous procure une base de données virtuelle très complète du GSL afin de créer des relations empiriques d'état d'englacement du haut/bas estran. C'est également à partir de cette simulation de référence que seront « reconstituées » les séries temporelles de l'état d'englacement du haut/bas estran pour les saisons glacielles non suivies ou incomplètes de la période 2000-2015 (deuxième objectif spécifique).

La simulation réaliste MOR-NARR/GEM + vents CFSR est utilisée pour produire les conditions de vagues 2000-2015. Plus exactement, les données sont produites avec les forçages NARR entre 2000 et 2010 puis avec les forçages de GEM entre 2010 et 2015 et CFSR pour les vents 2000-2015.

Le tableau 8 présente les champs simulés (variables) utilisés dans le cadre de ce projet de même que les simulations à partir desquelles ils sont produits.

Variables	Spécifications	Forçages atmosphériques	Modèles physiques	Modèles empiriques
Niveau d'eau	incluant : marée, empilement par le vent	GEM 2010-2015	MOR-CICE5	
État d'englacement de l'estran	Concentration et épaisseur de glace sur le haut estran et sur le bas estran	GEM 2000-2015	MOR-CICE5	Relations empiriques de glace de haut et bas estran
Paramètres de vagues	Hauteur, période, orientation	MOR-NARR 1979- 2010 MOR-GEM 2010- 2015 + CFSR 1979-2015 (pour les vents)	MOR-CICE5 et WaveWatch III	

Tableau 8. Variables utili	sées produites	à partir de	e simulations	réalistes pour la
période 2000-2015	-	-		-

## 2.5.2. Simulations climatiques (AEV bTq, AHJ et BBHI)

Les simulations climatiques MOR-AEV bTq, MOR-AHJ et MOR-BBHI, couvrant la période 1981-2070, permettent de comparer les climatologies du passé récent (1981-2010) et de l'horizon 2055 (2041-2070) pour l'ensemble des champs simulés et ainsi en établir les tendances. Chacune des simulations est réalisée pour l'ensemble du domaine spatial de manière à générer de l'information pour tous les sites témoins.

Dans le cas de la simulation MOR-AEV bTq, les forçages atmosphériques proviennent de la version 4.2.3 du Modèle Régional Climatique Canadien (MRCC), piloté par le membre 5 du CGCM3.1/t47 suivant le scénario SRES A2 du GIEC. Cette simulation présente un biais froid de température. Elle a donc été débiaisée en utilisant une méthode de débiaisage par quantiles, d'où le suffixe bTq. Une description détaillée du biais et de la méthode est disponible à l'annexe A2.1 du rapport du projet X012.1 « Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques ». Dans le cas de la simulation MOR-AHJ, les forçages atmosphériques proviennent de la version 4.2.3 du MRCC, piloté par le membre 3 de modèle global ECHAM5 suivant le scénario SRES A2 du GIEC. Dans le cas de la simulation MOR-BBHI, les forçages atmosphériques proviennent de la version 4.2.3 du MRCC5 piloté par le membre 2 du modèle global CanESM2 suivant le scénario RCP\_8.5 du GIEC pour le futur.

Contrairement à la simulation MOR-GEM, les simulations MOR-"climats" ne peuvent être validées. Elles reproduisent une réalité probable du GSL à l'intérieur des bornes fixées par la variabilité naturelle du GSL inhérente au système d'équations non linéaires qui décrivent la physique. Cependant, les moyennes sur une période de 30 ans ainsi que le nombre d'évènements extrêmes doivent être conformes à la réalité. C'est l'anomalie entre la période du futur (2041-2070) et celle du passé récent (1982-2011) qui nous permettra de prédire l'évolution réelle du GSL.

Notons que le scénario d'émission de gaz à effet de serre RCP\_8.5 est le plus pessimiste des scénarios RCP (réchauffement le plus important, +8,5 W/m<sup>2</sup>). C'est aussi le scénario qui génère la simulation la plus chaude (BBHI) de celles utilisées dans le cadre de ce rapport. Le tableau 9 résume les scénarios, forçages et modèles utilisés pour chacune de ces simulations.

Nom de la simulation	Scénarios	Forçages atmosphériques	Modèle	Champs simulés et utilisés dans ce projet
MOR-AEV bTq	SRES A2, GIEC	MRCC, version 4.2.3 piloté par le membre 5 du CGCM3.1/t47	MOR- CICE5	Concentration de glace de mer Degrés-heure de
MOR-AHJ	SRES A2, GIEC	MRCC, version 4.2.3 piloté par le membre 3 de ECHAM5	MOR- CICE5	gel Degrés-heure de
MOR-BBHI	RCP_8.5, GIEC	MRCC5, version 3.3.3.1 piloté par le membre 2 de CanESM2	MOR- CICE5	dégel Niveau d'eau

# Tableau 9. Simulations climatiques utilisées pour produire les conditions de glace pour la période 1981-2070

### 2.5.2.1. Niveau d'eau obtenu à l'aide des simulations

Le niveau d'eau généré par le modèle océanique régional (MOR) pour les simulations réalistes (réanalyses) et les simulations climatiques comprend l'effet des marées, des courants et de l'effet d'empilement par le vent. Cependant, les données de niveau d'eau ne tiennent pas compte de la variation du niveau marin. En ce sens, la hausse du niveau marin n'est pas incluse dans les données de niveau d'eau du modèle. Le niveau d'eau n'intègre pas l'effet des surcotes par effet de baromètres inverses.

Les données de niveau d'eau produites sont relatives à l'état de la nappe d'eau au moment initial (valeur au démarrage, niveau de référence). Le niveau d'eau n'est donc pas donné par rapport au référentiel géodésique ou marégraphique.

# 2.5.4. Limites méthodologiques liées à l'utilisation de modèle et de scénarios

L'article rédigé par Charles et al. (2012) comprend une section qui synthétise particulièrement bien les incertitudes relatives à l'utilisation de modèles et de scénarios. Nous revenons donc sur les limites et incertitudes relevées par ces auteurs et qui s'appliquent au présent projet. Ainsi, les auteurs rappellent que les scénarios d'émission de gaz à effet de serre sont basés sur la définition de conditions socio-économiques et que conséquemment, les niveaux d'émission de gaz à effet de serre comportent des incertitudes. Dans le cadre de ce rapport, deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre différents ont été utilisés (SRES A2 et RCP\_8.5). Il s'agit de scénarios généralement pessimistes. Ceci signifie que les changements climatiques générés par différents modèles sont les plus marqués, mais qu'ils ne représentent qu'une version de la réalité future probable des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Aussi, comme il est souvent impensable d'utiliser tous les modèles climatiques disponibles, des choix doivent être faits à tous les niveaux. Par exemple, dans le cadre de ce projet, seuls les scénarios A2 et RCP 8.5 ont été retenus alors qu'il en existe plusieurs autres. De la même manière, plusieurs formules existent pour calculer le runup, mais ce sont les équations de Stockdon et al. (2006) qui ont été choisie. À ce sujet, aucune équation de runup n'a été directement validée dans le cadre de ce projet. Le choix de Stockdon et al. (2006) repose sur le fait qu'il s'agit de l'équation qui a été validée et testée dans le cadre d'autres projets réalisés au Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières. Idéalement, de nombreux scénarios, modèles et formules devraient être testés pour définir l'étendue des conditions climatiques, de vagues et de glace futures possibles. Cependant, pour des questions évidentes de moyens et de temps, les travaux publiés dans la littérature scientifique présentent, comme il est fait ici, les résultats d'un nombre limité de scénarios, modèles et formules. Enfin, les méthodes de corrections et de débiaisage comportent elles aussi des incertitudes. Dans le cadre de ce projet, celles-ci ont été réalisées par les chercheurs de l'ISMER. À titre d'exemple, le débiaisage de la simulation AEV bTq est décrit à la section A2.1 du rapport final du projet X012.1. Bref, l'utilisation de modèles et de scénarios implique une certaine quantité de limites et d'incertitudes qu'il est bon d'identifier ici. Celles-ci sont liées à la production et aux choix de scénarios d'émission et de concentration de gaz à effet de serre, aux choix des modèles climatiques et formules (ex. runup) de même qu'aux méthodes de correction ou de débiaisage des données (Charles et al. 2012).

# 3. LOCALISATION DES SITES TÉMOINS

Ce projet de recherche est mené simultanément sur 13 sites témoins, pour un total de 16 segments d'analyse, à l'échelle de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (figure 15). Ceci permet d'inscrire les connaissances sur la dynamique et les effets de l'englacement du haut estran à l'intérieur de la dynamique générale de la glace de mer. Ainsi, en plus de s'inscrire dans un contexte géographique diversifié où la dynamique générale de la glace de mer diffère, les sites proposés représentent plusieurs types de côte et d'estran lesquels sont largement représentés à l'échelle de l'Est du Québec. Les sites suivis en bordure de terrasses de plage et de flèches littorales, lesquelles représentent 25,1 % des côtes de l'Est du Québec, sont localisés à Rivière-Pentecôte et Longue-Pointe-de-Mingan sur la Côte-Nord et à Saint-Ulric et Rivière-à-Claude sur la rive sud de même qu'à Penouille et Maria sur la péninsule gaspésienne. Le site suivi le long de falaises rocheuses, 17,4 % des côtes de l'Est du Québec, est localisé en Gaspésie, soit à Chandler (falaise rocheuse de grès). Les sites suivis le long de falaises meubles, qui représentent 13,1 % des côtes de l'Est du Québec, sont localisés à Baie-Saint-Ludger, Pointe-Lebel et Rivière-Saint-Jean sur la Côte-Nord. Enfin, les sites de Pointe-aux-Loups et de La Martinique sont des côtes à tombolo/cordon littoral, qui représentent 3 % des côtes à l'échelle de l'Est du Québec, mais 40 % des côtes aux Îles-de-la-Madeleine. Tous ces types de côtes sont reconnus pour leur sensibilité aux agents hydrodynamiques et donc, aux modifications pouvant être générées par les changements anticipés de l'état d'englacement de l'estran.

La majorité des sites de suivi avec caméras sont localisés le long de tronçons routiers qui font l'objet d'un suivi pour le risque d'érosion par les directions territoriales du MTQ du Bas-Saint-Laurent–Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine et de la Côte-Nord. Les sites de Baie-Saint-Ludger, de Pointe-Lebel, de Rivière-Pentecôte, de Rivière-Saint-Jean, de Longue-Pointe-de-Mingan sur la Côte-Nord de même que le site de Penouille en Gaspésie sont libres d'infrastructures de protection. La côte y évoluant librement, ces sites sont idéals pour comprendre l'effet de l'état d'englacement du haut estran sur l'évolution de la ligne de rivage. À Maria, le tronçon suivi par caméra comprend à la fois un segment côtier sans infrastructure (Maria) et un segment côtier aménagé d'un muret (Pointe-Verte).

Les sites témoins ont déjà fait l'objet de caractérisations dans le cadre de d'autres projets de recherche. Les informations concernant la dynamique hydrosédimentaire proviennent pour la plupart des travaux effectués dans le cadre du projet X008.1 « Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est-du-

Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques » (Drejza et al., 2015) (péninsule de Manicouagan, Pentecôte, Rivière-Saint-Jean, Longue-Pointe-de-Mingan, Saint-Ulric, Rivièreà-Claude, Penouille et Chandler). Aussi, des cartes d'exposition à l'érosion et à la submersion de même que de dynamique hydrosédimentaire pour 12 des 16 segments d'analyse sont déjà disponibles. Les données de dynamiques hydrosédimentaires de Maria et Pointe-Verte proviennent des travaux de Bernatchez et. al. (2012, Avignon) et celles de La Martinique et Pointe-aux-Loups, de Bernatchez et. al. (2012).



Figure 15. Localisation des sites témoins à l'échelle de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent
## 4. RELATIONS EMPIRIQUES DÉVELOPPÉES POUR PRODUIRE LES SÉRIES TEMPORELLES DE CONDITIONS D'ENGLACEMENT POUR LA PÉRIODE 1981-2070

Étant donné le nombre de relations empiriques construites (60), il serait laborieux de les décrire toutes. Une approche par tableau (tableau 10 et tableau 11) avec la description d'un seul exemple a plutôt été retenue. Par contre, le script MATLAB utilisant ce tableau et permettant de produire toutes les séries temporelles de glace d'estran modélisé figure à l'annexe G. À titre d'exemple donc, la démarche pour le développement vertical du pied de glace de bas estran du site Baie-Saint-Ludger est présentée ici. Pour cette relation, la prise de glace survient lorsque les degrés-heure de gel atteignent 1500 °C\*h. Le développement vertical du pied de glace est proportionnel à la dérivée première des degrés-heure de gel multiplié par le scalaire 0,007 jusqu'à ce que les degrés-heure de gel atteignent 5000 °C\*h. À partir de 5000 °C\*h, le développement vertical est proportionnel à l'épaisseur de glace de mer multipliée par le scalaire 0,6. Le retrait du pied de glace, ou encore la fin de la saison de glace, est atteinte guand les degrés-heure de dégel atteignent 140 °C\*h. Les valeurs maximums de développement vertical du pied de glace sur ce site plafonnent à 3,1 (sur l'échelle de 0 à 5). Une moyenne mobile de 3 jours est appliquée sur la portion du signal du pied de glace qui est proportionnelle à la glace de mer seulement. Les résultats de cette relation sont comparés aux observations aux figures 16 et 17. Des figures de ce type ont aussi été produites pour tous les sites et ont été présentées à l'annexe B du rapport méthodologique 2 (Corriveau et al., 2017).



Figure 16. Série temporelle (2009-2015) du développement vertical du pied de glace de bas estran de Baie-Saint-Ludger. Les observations sont en noir et le résultat de la relation empirique est en magenta



Figure 17. Série temporelle zoomée (2012-2013) du développement vertical du pied de glace de bas estran de Baie-Saint-Ludger. Les observations sont en noir et le résultat de la relation empirique est en magenta

Pour mieux comprendre le tableau des paramètres numériques (tableau 11), voici les variantes possibles pour le développement vertical du pied de glace de bas estran sur différents sites ;

- La prise peut se produire en fonction de la prise de la glace de mer (col 5) plutôt qu'avec un seuil de degrés-heure de gel (col 4) comme vu dans l'exemple de Baie-Saint-Ludger. Par exemple, le pied de glace peut se développer à partir du moment où la glace de mer atteint 10 cm pour la première fois.
- Dans certains cas, le pied de glace n'est pas modélisé en 2 étapes comme à Baie-Saint-Ludger (col 7, 8 et 10), mais en une seule. Le pied de glace peut être proportionnel à la glace de mer durant toute la saison de glace (col 10) comme il peut être proportionnel seulement aux dérivées des degrés-heure de gel dans le cas d'une année dite chaude (col 6 et 7, maximum des degrés-heure de gel de la saison en dessous d'un certain seuil).
- Le retrait peut également être fonction de la glace de mer (col 13) plutôt que de degrés-heure de dégel (col 14).
- Le plafond atteint par la relation empirique (col 12), la portion sur laquelle la moyenne mobile est appliquée (col 15) ainsi que le nombre de jours de la moyenne mobile (col 16) varient de relation en relation pour optimiser cette dernière.

Une fois la relation construite, celle-ci est optimisée en faisant varier les paramètres numériques de la relation (les paramètres étant 1500 °C\*h, 0,007, 5000 °C\*h, 0,6, 140 °C\*h, 3,1, 72 h dans l'exemple précédent) afin de minimiser la somme des différences au carré entre les observations et les résultats de l'équation empirique (erreur des moindres carrés). L'aspect visuel et le coefficient de corrélation de Pearson (R<sup>2</sup>) sont également pris en compte dans l'optimisation. Le coefficient de corrélation nous permet de constater s'il y a une corrélation linéaire entre les 2 ensembles de données tandis que l'erreur des moindres carrés est plutôt une façon d'évaluer si les 2 courbes convergent. Les paramètres retenus sont donc la combinaison qui minimise l'erreur des moindres carrés et qui visuellement correspond aux observations.

Colonne	Description
col 4	Seuil des degrés-heure de gel pour commencer la prise
col 5	Seuil de la glace de mer pour commencer la prise
col 6	Seuil du maximum des degrés-heure de gel de la saison pour déterminer si une année est chaude par rapport aux autres années de ce site
col 7	Scalaire multiplicatif d'une section proportionnel à la dérivée première des degrés- heure de gel
col 8	Seuil des degrés-heure de gel pour changer de mode de simulation (changer de proportionnel à la dérivée des degrés-heure de gel à proportionnel à la glace de mer)
col 9	Seuil du développement vertical du pied de glace de bas estran stabilisant la glace de haut estran (une fois ce seuil atteint, la glace de haut estran cesse d'évoluer)
col 10	Scalaire multiplicatif d'une section proportionnelle à la glace de mer
col 11	Seuils exceptionnels non utilisés dans la majorité des autres relations
col 12	Valeur maximum atteinte par la relation
col 13	Seuil de la glace de mer déterminant la fonte du pied de glace
col 14	Seuil des degrés-heure de dégel déterminant la fonte du pied de glace
col 15	Section sur laquelle la moyenne mobile est appliquée, s'il n'y a pas de valeur, elle est appliquée sur toute la relation
col 16	Nombre d'heures de la moyenne mobile

#### Tableau 10. Descriptifs du contenu des colonnes du tableau 11

Site	Estran	Variable	deg h gel 1	gdm	chaude max dhg	scalaire dhg	deg h gel 2	DV BE	scalaire gdm	excep-tion	plafond	gdm fin	deg h degel	Sec moy mob	moy mob (h)
Col 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Bac	Concentration	342			0,32	5659		2,28		100	0		2	240
1. Saint-	Das	Dév. vertical	1195			0,0093	5888		0,18		4	0		2	264
Ulric	Haut	Concentration	1500			0,31		3			100		570	1	192
	Tiaut	Dév. vertical	1900			0,0155		3			4		506	1	192
2. Pointe-	Haut	Concentration		0	5500	0,8			0,75		100	10			360
aux-Loups	Tiaut	Dév. vertical		0		0,05	4410		0,14		3,5	20			360
3. La	Haut	Concentration													
Martinique	Tiaut	Dév. vertical													
	Bas	Concentration	900			0,175	6000		1,9		100		120	2	96
4. Pointe-	Das	Dév. vertical	1800			0,0075	4300		1		3,1		138	2	96
Lebel	Hout	Concentration	200			0,28		2,5			100		450	1	228
	Tiaut	Dév. vertical	200			0,02		2,5			4		450	1	160
	Bac	Concentration													
5. Baie-	Das	Dév. vertical													
Ludger	Haut	Concentration													
F	Tiaut	Dév. vertical													

#### Tableau 11. Paramètres numériques utilisés dans les relations empiriques

Site	Estran	Variable	deg h gel 1	шрб	chaude max dhg	scalaire dhg	deg h gel 2	DV BE	scalaire gdm	excep-tion	plafond	gdm fin	deg h degel	Sec moy mob	moy mob (h)
	Bas	Concentration	7700						1,2		100		200		38
6 Maria	Duo	Dév. vertical		10					0,15		3,5	0			96
0. Maria	Haut	Concentration	6500			0,17		1,6			40		460	1	276
	Tiaut	Dév. vertical		10		0,012		1,6			3,5		480	1	276
	Bas	Concentration	7200						1,4		100		210		96
7. Pointe-	Das	Dév. vertical		0					0,3		3,5	0			72
Verte	Hout	Concentration		65		0,4		2,5			100		580	1	158
	Tiaut	Dév. vertical		0		0,014		2,5			4		910	1	158
	Bas	Concentration													
8. Rivière	Das	Dév. vertical													
Saint-Jean	Hout	Concentration													
	Tiaut	Dév. vertical													
	Poo	Concentration		0	25000				17	1,2	100	0			96
9. Popouillo 1-	Das	Dév. vertical		3	25000	0,008	10300		20	0,25	3,05		1020		216
3	Hout	Concentration		0		0,29		1,5			65	4		1	192
	Tiaut	Dév. vertical	3800			0,014		1,8			3,1		1100	1	192
	Bac	Concentration	1150			0,37	4200			100	100		1470		
10. Banavilla 4	Das	Dév. vertical	1500			0,015		10			3,5		1780		
5	Hout	Concentration	1160			0,6		2,5			100		1930	1	48
	Πauι	Dév. vertical	1310			0,04		2,5			3	17		1	72

Site	Estran	Variable	deg h gel 1	шрб	chaude max dhg	scalaire dhg	deg h gel 2	DV BE	scalaire gdm	excep-tion	plafond	gdm fin	deg h degel	Sec moy mob	moy mob (h)
	Bas	Concentration		10					1,6		100		282		48
11. Rivière-	Duo	Dév. vertical		0					0,18		3		280		72
à-Claude	Haut	Concentration		1		0,24		1,9			100	40		1	120
	Tiaut	Dév. vertical	4300			0,013		1,7			3,8		620	1	144
	Bas	Concentration	6900						1,1		100		260		60
12 Chandler	Das	Dév. vertical	7000						0,11		3		260		120
12. Ghanulei	Hout	Concentration		50		0,22		2			100		480	1	144
	naul	Dév. vertical		5		0,014		0,7			4		520	1	192
	Pag	Concentration	4700						0,9		100		190		48
13. Rivière	DdS	Dév. vertical	4700						0,15		3		190		48
Pentecôte	Hout	Concentration		1		0,06		0,8			30		690	1	216
	naul	Dév. vertical		1		0,01		0,8			3,5		660	1	240
	Pag	Concentration	7400						1		100		57		48
14. Longue-	DdS	Dév. vertical		0					0,1		2		57		24
Mingan B_est	Hout	Concentration		10		0,26		0,5			100		720	1	240
	Παυι	Dév. vertical		1		0,01		0,5			3,1		800	1	228
	Pag	Concentration		10					1		100		102		72
15 Longue- Pointe-de-	Das	Dév. vertical		0					0,15		3		102		72
Mingan B ouest	Llout	Concentration		1		0,11		0,5			30	15,8		1	144
B_ouest Hau	naut	Dév. vertical		1		0,012		0,5			3		780	1	120

Site	Estran	Variable	deg h gel 1	gdm	chaude max dhg	scalaire dhg	deg h gel 2	DV BE	scalaire gdm	excep-tion	plafond	gdm fin	deg h degel	Sec moy mob	moy mob (h)
	Bac	Concentration	10800						1		100		57		48
16. Longue-	Das	Dév. vertical	10800						0,13		3		57		48
Mingan D	Hout	Concentration		0				0,5	0,9		40		800	1	120
	Haut	Dév. vertical	1600			0,009		0,5			3		800	1	144

Le tableau 12 résume les corrélations et montre l'erreur quadratique moyenne (EQM, RMSE, root mean square error) pour chacune des relations empiriques. Il est à noter qu'une moyenne sur 24 h, pour n'avoir qu'une donnée par jour, a été faite avant de calculer R<sup>2</sup> et RMSE. On évalue également si la durée de l'englacement est bien modélisée et si la relation représente bien les valeurs tirées des photos. Il est possible de voir dans ce tableau que, parfois, les R<sup>2</sup> et les EQM sont peu élevés pour une relation, mais que la durée et les valeurs ont bien été modélisées. Cela est dû au fait que la variabilité modélisée ne se superpose pas directement à la variabilité des observations, mais qu'elle reste représentative de la variabilité observée.

Les R<sup>2</sup> du tableau précédent sont ceux obtenus avec la première version de la simulation témoin MOR-GEM. Cette simulation a été légèrement modifiée après avoir complété le développement des relations empiriques. En conséquence, si l'on compare les résultats des relations empiriques générées avec la version initiale (utilisée pour leur développement) et la version modifiée, les R<sup>2</sup> changent légèrement pour certains sites et de manière plus importante pour d'autres. Le tableau de comparaison entre les R<sup>2</sup> se situe à l'annexe H.

Tableau 12. Corrélation de Pearson entre le pied de glace observé et modélisé et erreur quadratique moyenne calculée sur toute l'année. La durée d'englacement et les valeurs modélisées sont près des observations lorsqu'un X est présent. Des commentaires sur des biais possibles dus aux relations empiriques sont présentés dans la dernière colonne

Site	Estran	Variable	R <sup>2</sup>	EQM	Durée	Valeurs	Commentaires
	Poo	Concentration	87	14	х	х	
1 Saint-Illric	Das	Dév. vertical	82	0.6	х		Surestimation possible
	Hout	Concentration	83	15	х		Surestimation possible
	Haul	Dév. vertical	86	0.6	х	х	
		Concentration	63	16	х		Sous-estimation volontaire
2. Pointe-aux-Loups	Haut	Dév. vertical	83	0.5			Retard du retrait et sous-estimation des années chaudes
3. La Martinique	Haut	Concentration	58	13	x		Sous-estimation volontaire des années froides (constant 50) et sous-estimation des années chaudes
		Dév. vertical	91	0.5	х	х	
		Concentration	40	20	х		Manque d'excursions de 0 à 100 %
4. Pointe-Lebel	Bas	Dév. vertical	37	0.7	х		Manque parfois d'excursions de 0 à 3, variabilité décalée
	Hout	Concentration	84	13	х	х	
	Haul	Dév. vertical	82	0.7	х	х	Surestimation possible
	Bas	Concentration	33	20		х	Sous-estimation de la durée de 2 années et manque parfois d'excursions de 0 à 100 %
5. Baie-Saint-Ludger	Das	Dév. vertical	33	0.8		x	Sous-estimation de la durée de 2 années et manque parfois d'excursions de 0 à 3
	Hout	Concentration	84	16	х	х	
	ridut	Dév. vertical	86	0.6	х	х	

Site	Estran	Variable	R <sup>2</sup>	EQM	Durée	Valeurs	Commentaires
	Bas	Concentration	36	26			Sous-estimation de la durée de 2 années, manque parfois d'excursions de 0 à 100 %, variabilité parfois décalée
6. Maria		Dév. vertical	28	0.7	х		Manque parfois d'excursions de 0 à 3, variabilité décalée
	Hout	Concentration	90	5	х		Légèrement surestimé
	Haul	Dév. vertical	84	0.5	х	х	
		Concentration	70	21			Manque d'excursions de 0 à 100 % et manque la prise partielle
7. Pointe-Verte	Bas	Dév. vertical	50	1			Le moment de retrait n'est pas parfait, manque d'excursions 0 à 3 et sature à 3,5 donc possible surestimation future
	Haut	Concentration	89	16			Manque la prise partielle, plafond élevé pour le futur, observation plus variable que la simulation
		Dév. vertical	85	0.8	х	х	
		Concentration	35	17	х	х	Manque parfois d'excursions de 0 à 100 %
8. Rivière Saint-Jean	Bas	Dév. vertical	42	0.7	х		Manque parfois d'excursions de 0 à 3, variabilité décalée
	Haut	Concentration	58	22		х	La durée n'est pas optimale
	Tlaut	Dév. vertical	74	0.8	х	х	
	Boo	Concentration	60	21			Manque parfois la prise partielle et manque d'excursions de 0 à 100 %
9. Penouille 1-3	Das	Dév. vertical	69	0.6	х	x	Manque parfois la prise partielle et manque parfois d'excursions de 0 à 3
	Hout	Concentration	84	11	х	х	
	naul	Dév. vertical	89	0.4	х	х	

Site	Estran	Variable	R <sup>2</sup>	EQM	Durée	Valeurs	Commentaires
	Poo	Concentration	91	13	х	х	
10 Popovillo 4 5	Das	Dév. vertical	90	0.5	х	х	
To. Periodille 4-5	Haut	Concentration	87	15	х	х	
	naul	Dév. vertical	87	0.5	х		Surestimation de la prise partielle
	Baa	Concentration	66	23	х		Manque parfois excursions 0 à 100 %
11 Pivière à Claude	Das	Dév. vertical	70	0.7	х		Manque parfois excusions 0 à 3
TT. RIVIERE-a-Claude	Hout	Concentration	81	15	х		Sous-estimation et manque parfois de variabilité
	Haut	Dév. vertical	90	0.5	х	х	
		Concentration	41	20	х		Manque d'excursion de 0 à 100 %
12. Chandler	Bas	Dév. vertical	38	0.4	х		Sous-estime les années avec indice de développement élevé, manque d'excursions de 0 à 2
	Hout	Concentration	74	15	х	х	
	Haul	Dév. vertical	83	0.6	х	х	
	Poo	Concentration	40	17	х	х	
12. Divière Pentecôte	Das	Dév. vertical	30	0.7	х	х	
15. Riviere Penlecole	Hout	Concentration	64	6		х	La durée n'est pas optimale
	naul	Dév. vertical	75	0.7		х	La durée n'est pas optimale
	Baa	Concentration	36	19	х		Variabilité décalée
14. Longue-Pointe-de-	Das	Dév. vertical	30	0.6	х		Sous-estimation possible
Mingan B_est	Hout	Concentration	88	16	х	х	
	naul	Dév. vertical	88	0.5	х	х	

Site	Estran	Variable	R <sup>2</sup>	EQM	Durée	Valeurs	Commentaires
	Poo	Concentration	38	14			La durée n'est pas optimale et la variabilité est décalée
15. Longue-Pointe-de- Mingan B_ouest	Das	Dév. vertical	26	0.6			La durée n'est pas optimale et la variabilité est décalée
	Hout	Concentration	66	5	х	х	
	Haul	Dév. vertical	84	0.5	х	х	
	Poo	Concentration	40	19	х	х	
16. Longue-Pointe-de- Mingan D	Das	Dév. vertical	36	0.6	х	х	
	Hout	Concentration	83	7	х		Légèrement sous-estimé
	ridul	Dév. vertical	90	0.4	x	x	

#### 4.1. Limites des équations des relations empiriques

Les relations empiriques étant développées sur un nombre d'années d'observation donné, toutes les situations possibles ne sont évidemment pas représentées. Par contre, nous avons pu suivre des années particulièrement chaude et des années plutôt froide ce qui nous permet de reproduire les données de concentration et d'épaisseur de glace tant sous des conditions plus chaude que plus froide. Dans certains cas, une seule et unique équation n'a pas permis de reproduire les conditions chaudes comme les conditions froides. Il s'agit des sites de Rivière Saint-Jean de Penouille 1-3, de Pointe-aux-Loups.

Pour le site de Rivière Saint-Jean, il est important de noter que, pour le bas estran de ce site, le modèle n'arrive pas à reproduire les observations des années considérées chaudes. Toutefois, il a été observé que des années de température similaire sont rares (de 0 à 17 années en 91 ans de simulation climatique dépendant de la simulation climatique et du seuil appliqué pour déterminer une année chaude). De ce fait, les relations empiriques appliquées sur ces années chaudes ont un poids relativement faible dans les calculs de tendances. Les relations empiriques peuvent être effectuées avec les seuils inférieurs et supérieurs. De cette façon, les analyses subséquentes pourront être faites avec les deux relations et proposer une fourchette de prévisions possibles.

Pour le site de Penouille 1-3, il est important de noter que, pour le bas estran de ce site, le modèle n'arrive pas à reproduire les observations des années considérées froides. Toutefois, il a été observé que des années de température similaire sont plutôt fréquentes (de 0 à 83 années en 91 ans de simulation climatique dépendant de la simulation climatique et du seuil appliqué pour déterminer une année froide). Il est difficile de tirer des conclusions sur les tendances de glace d'estran obtenues. Les relations empiriques peuvent être effectuées avec les seuils inférieurs et supérieurs. De cette façon, les analyses subséquentes pourront être faites avec les deux relations et proposer une fourchette de prévisions possibles.

Pour le site de Pointe-aux-Loups, il est important de noter que, pour la concentration de ce site, le modèle n'arrive pas à reproduire les observations des années considérées chaudes. Il a été observé que des années de température similaire sont plutôt fréquentes (de 13 à 51 années en 91 ans de simulation climatique dépendant de la simulation climatique et du seuil appliqué pour déterminer une année chaude). De ce fait, il est difficile de tirer

des conclusions sur les tendances de glace de rive obtenues. Les relations empiriques peuvent être effectuées avec les seuils inférieurs et supérieurs. De cette façon, les analyses subséquentes pourront être faites avec les deux relations et proposer une fourchette de prévisions possibles.

Dans le cas des sites de Longue-Pointe-de-Mingan, les relations empiriques ont été construites et comparées à seulement trois saisons de suivi. Nous ne savons pas si les relations représentent bien les conditions de glace et la variabilité interannuelle à cette station. Il est donc important de tenir compte de cette limite importante au moment de tirer des conclusions sur les tendances de glace de rive obtenues.

Enfin, soulignons de nouveau que certaines limites mineures figurent à la colonne « commentaires » au tableau 12.

### 5. ÉVOLUTION DES CONDITIONS D'ENGLACEMENT ENTRE PASSÉ RÉCENT ET L'HORIZON 2055 POUR TOUS LES SITES TÉMOINS

Les sections suivantes présentent l'évolution de la saison glacielle entre le passé récent et l'horizon 2055 pour tous les sites témoin. Les données présentées correspondent à la moyenne des trois simulations climatiques utilisées (AEV bTq, AHJ et BBHI). L'annexe I présente en détail les résultats pour chacun des sites témoins et pour chacune des simulations.

Les figures 18 et 19 donnent un aperçu global de l'évolution de la chronologie et de la durée de la saison glacielle sur le haut et le bas estran pour l'ensemble des segments d'analyse. Les sous-sections suivantes présentent les résultats pour l'évolution de la date de début et de la date de fin de la saison glacielle (section 5.1) de même que pour la durée de celle-ci (section 5.2). L'évolution du nombre de jours où la glace assure une protection contre l'impact des agents hydrodynamiques est aussi présentée (section 5.3).



Figure 18. Chronologie de la saison glacielle sur le haut estran pour le passé récent et pour l'horizon 2055



Figure 19. Chronologie de la saison glacielle sur le bas estran pour le passé récent et pour l'horizon 2055

# 5.1. Chronologie de la saison glacielle pour le passé récent et l'horizon 2055

#### 5.1.1. Haut estran

#### 5.1.1.1. Haut estran : début de la saison glacielle

Les résultats des simulations et des relations empiriques pour l'ensemble des site témoins pour le passé récent indiquent que la saison glacielle débutait, sur le haut estran, entre le 9 novembre (Pointe-Lebel) et le 6 janvier (Chandler) (figure 20). Cependant, pour la majorité des sites, la saison glacielle débutait au cours du mois de décembre.

Pour l'horizon 2055, la saison glacielle débutera plus tard, soit entre le 21 novembre (Pointe-Lebel) et le 29 janvier (Chandler) (figure 20). Pour la majorité des sites, on prévoit que la saison glacielle débute alors entre la fin décembre et la fin janvier. Ceci équivaut à un retard compris entre 12 jours et 23 jours et en moyenne de 16 jours (figure 21). Les retards les plus sévères sont attendus pour les sites de Chandler (23 jours) et Pointe-aux-Loups (23 jours).



Figure 20. Date moyenne du début de la saison glacielle pour le passé récent et l'horizon 2055, haut estran



Figure 21. Nombre de jours de retard du début de la saison glacielle prévus pour l'horizon 2055 par rapport au passé récent, haut estran

#### 5.1.1.2. Haut estran : fin de la saison glacielle

Les résultats des simulations et des relations empiriques pour l'ensemble des sites témoins pour le passé récent indiquent que la saison glacielle prenait fin, sur le haut estran, entre le 29 mars (Maria) et le 10 mai (Penouille 4-5) (figure 22). Cependant, pour la majorité des sites, la saison glacielle prenait fin au cours du mois d'avril.

Pour l'horizon 2055, la saison glacielle prendra fin plus tôt, soit entre le 1<sup>er</sup> mars (La Martinique) et le 6 avril (Longue-Pointe-de-Mingan) (figure 22). Pour la majorité des sites, on prévoit que la saison glacielle prenne fin au cours du mois de mars. Ceci équivaut à une avance de 14 jours à 46 jours (moyenne de 21 jours) (figure 23). Avec des fins plus hâtives de 34 jours (Pointe-aux-Loups) et de 46 jours (La Martinique), c'est aux Îles-de-la-Madeleine que l'écart entre la date de fin de la saison glacielle entre le passé récent et l'horizon 2055 est le plus important.



Figure 22. Date moyenne de la fin de la saison glacielle pour le passé récent et l'horizon 2055, haut estran



Figure 23. Nombre de jours d'avance de la fin de la saison glacielle prévus pour l'horizon 2055 par rapport au passé récent, haut estran

### 5.1.2. Bas estran

#### 5.1.2.1. Bas estran : début de la saison glacielle

Les résultats des simulations et des relations empiriques pour l'ensemble des site témoins pour le passé récent indiquent que la saison glacielle débutait, sur le haut estran, entre le 30 novembre (Penouille 4-5) et le 6 janvier (Chandler) (figure 24). Cependant, pour la majorité des sites, la saison glacielle débutait au cours du mois de décembre.

Pour l'horizon 2055, la saison glacielle débutera plus tard, soit entre le 14 décembre (Penouille 4-5 et Baie-Saint-Ludger) et le 23 janvier (Chandler) (figure 24). Pour la majorité des sites, on prévoit que la saison glacielle débutera au cours du mois de janvier. Ceci équivaut à un retard compris entre 12 jours et 19 jours et en moyenne de 15 jours (figure 25). Les retards les plus sévères sont attendus pour les sites de Chandler (18 jours) et Penouille (19 jours).



Figure 24. Date moyenne du début de la saison glacielle pour le passé récent et l'horizon 2055, bas estran



Date du début de la saison glacielle

Figure 25. Nombre de jours de retard du début de la saison glacielle prévus pour l'horizon 2055 par rapport au passé récent, bas estran

#### 5.1.2.2. Bas estran : fin de la saison glacielle

Les résultats des simulations et des relations empiriques pour l'ensemble des site témoins pour le passé récent indiquent que la saison glacielle prenait fin, sur le bas estran, entre le 8 mars (Pointe-Lebel) et le 7 mai (Penouille 4-5) (figure 26). Cependant, pour la majorité des sites, la saison glacielle prenait fin au cours du mois de mars.

Pour l'horizon 2055, la saison glacielle prendra fin plus tôt, soit entre le 10 février (Pointe-Lebel et Baie-Saint-Ludger) et le 20 avril (Penouille 4-5) (figure 26). Pour la majorité des sites, on prévoit que la saison glacielle prenne fin entre la mi-février et la mi-mars. Ceci équivaut à une avance de 17 jours à 28 jours (moyenne de 22 jours) (figure 27). L'écart entre la date de fin de la saison glacielle entre le passé récent et l'horizon 2055 est le plus important à Penouille 1-3 (28 jours), Longue-Pointe-de-Mingan B\_est (28 jours), Baie-Saint-Ludger et Pointe-Lebel (27 jours).



Figure 26. Date moyenne de la fin de la saison glacielle pour le passé récent et l'horizon 2055, bas estran



Date du début de la saison glacielle

Figure 27. Nombre de jours d'avance de la fin de la saison glacielle prévus pour l'horizon 2055 par rapport au passé récent, bas estran

# 5.2. Durée de la saison glacielle sur le haut estran et le bas estran pour le passé récent et l'horizon 2055

Le retard dans le début de la saison glacielle et l'avance dans la fin de la saison glacielle font en sorte que la durée de la saison est écourtée.

#### 5.2.1. Haut estran : durée de la saison glacielle

Au cours du passé récent, la saison glacielle sur le haut estran durait, d'après les résultats des simulations, entre 84 jours (Chandler) et 165 jours (Penouille 4-5) en moyenne (figure 28). Sous les conditions prévues pour l'horizon 2055, la saison glacielle perd entre 30 jours (Rivière-Saint-Jean) et 67 jours (La Martinique) (figure 29). Cette diminution s'effectue à une vitesse équivalente à -0,5 jour/an (Rivière Saint-Jean) à -1,12 jour/an (La Martinique) entre le passé récent et l'horizon 2055 (figure 29). Proportionnellement à la durée de la saison glacielle initiale, cette évolution correspond à une diminution comprise entre 19 % (Penouille 4-5) à -58 % (Chandler) (figure 30). Ainsi, sur le haut estran, la durée prévue de la saison glacielle est désormais comprise entre 35 jours (Chandler) et 133 jours (Penouille 4-5) (figure 28).



Figure 28. Évolution de durée de la saison glacielle sur le haut estran (nombre de jours) pour le passé récent et l'horizon 2055

#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES







Figure 30. Évolution (%) de la diminution de la durée de la saison glacielle sur le haut estran entre le passé récent et l'horizon 2055

#### 5.2.1. Bas estran : durée de la saison glacielle

Au cours du passé récent, la saison glacielle sur le bas estran durait, d'après les résultats des simulations, entre 67 jours (Maria) et 158 jours (Penouille 4-5) en moyenne (figure 31). Sous les conditions prévues pour l'horizon 2055, la saison glacielle perd entre 31 jours (Penouille 4-5) et 48 jours (Penouille 1-3 et Longue-Pointe-de-Mingan B\_est) (figure 32). Cette diminution s'effectue à une vitesse équivalente à -0,51 jour/an (Penouille 4-5) jour/an à -0,81 jour/an (Longue-Pointe-de-Mingan B\_est) entre le passé récent et l'horizon 2055 (figure 32). Proportionnellement à la durée de la saison glacielle initiale, cette évolution correspond à une diminution comprise entre 20 % (Penouille 4-5) à 64 % (Chandler) (figure 33). Ainsi, sur le bas estran, la durée prévue de la saison glacielle est désormais comprise entre 26 jours (Chandler et Longue-Pointe-de-Mingan D) et 127 jours (Penouille 4-5) (figure 31).



Figure 31. Évolution de durée de la saison glacielle sur le bas estran (nombre de jours) pour le passé récent et l'horizon 2055
#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES



Figure 32. Diminution en nombre de jours et vitesses de la diminution en jour/an de la durée de la saison glacielle prévus pour l'horizon 2055 par rapport au passé récent, bas estran



Figure 33. Évolution en pourcentage de la diminution de la durée de la saison glacielle sur le bas estran entre le passé récent et l'horizon 2055

# 5.3. Nombre de jours où la glace de haut et de bas estran assure une protection contre l'érosion par les agents hydrodynamiques pour le passé récent et l'horizon 2055

Pour l'horizon 2055, on prévoit une dimunition du nombre de jours où la glace de haut et de bas estran est suffisamment développée pour assurer une protection contre les agents hydrodynamqiues occasionnant l'érosion à la côte.

Au cours du passé récent, le nombre de jours où la glace de haut et de bas estran est suffisamment développée pour assurer une protection contre les agents hydrodynamqiues était, d'après les résultats des simulations, compris entre 71 jours (Pointe-aux-Loups) et 161 jours (Penouille 4 5) (figure 34). Sous les conditions prévues pour l'horizon 2055, on prévoit une diminution du nombre de jours comprise entre 32 jours (Pointe-Verte et Longue-Pointe-de-Mingan B\_ouest) à 64 jours (Chandler) (figure 35). Proportionnellement au nombre de jours initial, cette évolution correspond à une diminution comprise entre -0,53 jour/an (Pointe-Verte) et -1,07 jour/an (La Martinique) entre le passé récent et l'horizon 2055 (figure 35). Ceci correspond à des baisses de l'ordre de 21 % (Penouille 4-5) à 81 % (Pointe-aux-Loups) (figure 36). Ainsi, le nombre de jours où la glace de haut et de bas estran est suffisamment développée pour assurer une protection contre les agents hydrodynamqiues est désormais comprise entre 14 jours (Pointe-aux-Loups) et 128 jours (Penouille 4-5) (figure 34).





#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES



Figure 35. Diminution en nombre de jours et vitesses de la diminution en jour/an du nombre de jours où la glace de haut et de bas estran assure une protection contre l'érosion par les agents hydrodynamiques prévue pour l'horizon 2055 par rapport au passé récent, bas estran





# 6. ÉVOLUTION DES CONDITIONS DE VAGUES ENTRE LE PASSÉ RÉCENT ET L'HORIZON 2055 POUR TOUS LES SITES TÉMOINS

L'analyse sommaire des conditions de vagues a été effectuée en calculant le nombre d'heures où la hauteur significative des vagues orientées vers la côte était supérieure au 95<sup>e</sup> percentile (calculé sur le passé récent), et ce, de manière annuelle et saisonnière. En complément, l'évolution de la hauteur maximale atteinte annuellement a aussi été réalisée. Les figures 37 à 50 aux suivantes sous-sections présentent l'évolution des conditions hydrodynamiques entre le passé récent et l'horizon 2055 tel que modélisée à partir de la simulation BBHI et du modèle WaveWatch III. Les cartes de localisation des points de grilles du modèle choisis pour l'extraction des données de vagues sont présentées à l'annexe F. De plus, les figures d'évolution des conditions de vagues réalisées pour chague site témoin peuvent être consultées à l'annexe J.

# 6.1. Nombre d'heures où la hauteur significative des vagues orientées vers la côte est supérieure au 95<sup>e</sup> percentile pour le passé récent et l'horizon 2055

Sur une base annuelle, on constate que le nombre d'heures où la hauteur significative des vagues orientées vers la côte est supérieure au 95<sup>e</sup> percentile (calculé sur le passé récent) est à la hausse pour tous les sites d'études, à l'exception de La Martinique (figure 38). Relativement au nombre d'heures simulées pour le passé récent, la hausse est particulièrement marquée pour les sites de la péninsule de Manicouagan (Baie Saint-Ludger et Pointe-Lebel) de même que pour les sites de la rive nord de la péninsule gaspésienne (Saint-Ulric et Rivière-à-Claude) (figure 39). Penouille 4-5 connaît une hausse très importante en pourcentage, mais le nombre d'heures y est plus petit qu'ailleurs et passe de seulement 9 à 35 heures annuellement.

Pour tous les sites témoins, à l'exception de La Martinique, le nombre d'heures où la hauteur significative des vagues est supérieure au 95e percentile est à la hausse pour l'hiver (DJF), le printemps (MAM) (figure 41 et figure 43). Ce nombre est généralement à la baisse pour l'été (JJA) (figure 45). Par contre, pour les sites de Baie-Saint-Ludger, de Pointe-Lebel, de Saint-Ulric et de Rivière-à-Claude, on prévoit plutôt une légère augmentation pour l'été. Enfin, l'évolution des conditions de vagues pour l'automne (SON) est plus partagée. On prévoit une baisse du nombre d'heures où la hauteur significative des vagues est supérieure au 95e percentile pour les sites de Chandler, Penouille 1-3, La Martinique, Rivière Pentecôte, Maria et Pointe-Verte alors qu'ailleurs, on prévoit plutôt une hausse (figure 47). L'augmentation des conditions de vagues les plus énergétiques est donc surtout à la hausse pour les mois de la saison glacielle.



Figure 37. Nombre d'heures moyen annuel où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (calculé sur le passé récent) pour le passé récent et l'horizon 2055 pour les vagues en direction de la côte durant l'année



Figure 38. Nombre d'heures moyen annuel de différence (delta) où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (calculé sur le passé récent) entre le passé récent et l'horizon 2055 pour les vagues en direction de la côte durant l'année



Figure 39. Évolution en pourcentage du nombre d'heures moyen annuel où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (calculé sur le passé récent) entre le passé récent et l'horizon 2055 pour les vagues en direction de la côte durant l'année



Figure 40. Nombre d'heures moyen annuel où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (calculé sur le passé récent) pour le passé récent et l'horizon 2055 pour les vagues en direction de la côte en hiver (DJF)



Figure 41. Nombre d'heures moyen annuel de différence (delta) où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (calculé sur le passé récent) entre le passé récent et l'horizon 2055 pour les vagues en direction de la côte en hiver (DJF)



Figure 42. Nombre d'heures moyen annuel où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (calculé sur le passé récent) pour le passé récent et l'horizon 2055 pour les vagues en direction de la côte au printemps (MAM)



Figure 43. Nombre d'heures moyen annuel de différence (delta) où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (calculé sur le passé récent) entre le passé récent et l'horizon 2055 pour les vagues en direction de la côte au printemps (MAM)



Figure 44. Nombre d'heures moyen annuel où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (calculé sur le passé récent) pour le passé récent et l'horizon 2055 pour les vagues en direction de la côte en été (JJA)



Figure 45. Nombre d'heures moyen annuel de différence (delta) où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (calculé sur le passé récent) entre le passé récent et l'horizon 2055 pour les vagues en direction de la côte en été (JJA)



Figure 46. Nombre d'heures moyen annuel où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (calculé sur le passé récent) pour le passé récent et l'horizon 2055 pour les vagues en direction de la côte en automne (SON)



Figure 47. Nombre d'heures moyen annuel de différence (delta) où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (calculé sur le passé récent) entre le passé récent et l'horizon 2055 pour les vagues en direction de la côte en automne (SON)

## 6.2. Hauteur significative maximale atteinte annuellement pour le passé récent et l'horizon 2055

Les conditions de vagues produites à partir de la simulation BBHI (la plus chaude) indiquent que la hauteur significative (Hs) des vagues au large sera à la hausse. La moyenne des valeurs maximums de Hs atteinte annuellement est à la hausse entre le passé récent et l'horizon 2055 pour tous les sites d'étude à l'exception de La Martinique (figure 48 et figure 49). En pourcentage, les hausses les plus marquées sont attendues pour les sites de Baie Saint-Ludger, Pointe-Lebel et Rivière Pentecôte sur la Côte-Nord et pour les sites de Saint-Ulric sur la rive nord de la péninsule gaspésienne (figure 50).

Bref, cette analyse sommaire montre que les conditions de vagues seront plus énergétiques pour l'horizon 2055, et ce, pour tous les sites témoins à l'exception de la Martinique.



Figure 48. Moyennes des hauteurs significatives maximales atteintes annuellement pour le passé récent et l'horizon 2055 pour les vagues en direction de la côte



Figure 49. Diférences entre les moyennes des hauteurs significatives maximales atteintes annuellement pour le passé récent et l'horizon 2055 pour les vagues en direction de la côte



Figure 50. Évolution en pourcentage des moyennes des hauteurs significatives maximales atteintes annuellement pour le passé récent et l'horizon 2055 pour les vagues en direction de la côte

# 7. ANALYSES DÉTAILLÉES PAR SITE TÉMOINS

# 7.1. Saint-Ulric

## 7.1.1. Description du segment d'analyse de Saint-Ulric

Le segment d'analyse de Saint-Ulric (MRC de La Matanie) appartient à la cellule hydrosédimentaire de la Tartigou qui s'étend du quai de Baie-des-Sables à l'entrée du village de Saint-Ulric (16 km) (figure 51). Le courant de dérive principale s'y effectue vers le sud-ouest. Les données de marnage de la station la plus proche sont celles de Matane (données détaillées à l'annexe K). Le marnage y est de 2,8 (marées moyennes) à 4,0 m (grandes marées).

Le site de Saint-Ulric est étudié à partir d'un segment d'analyse d'une longueur d'un peu plus de 4 km (4390 m) localisé entre l'embouchure de la rivière Tartigou à l'ouest et l'embouchure de la rivière Blanche à l'est (figure 52). Le suivi de ce segment est assuré, entre 2011 et 2015, par 3 caméras positionnées au même endroit, mais pointant dans des directions différentes (vers l'ouest, vers l'est et vers l'estran) (figures 53 à 57).



Tirée de Drejza et al. 2014, l'étoile indique la position des caméras

Figure 51. Cellule hydrosédimentaire de la Tartigou



Figure 52. Délimitation du segment d'analyse de Saint-Ulric



Figure 53. Prise de vue à la caméra Saint-Ulric Est et Ouest



Figure 54. Prise de vue à la caméra Saint-Ulric GLACE



Figure 55. Prise de vue oblique du littoral dans le secteur d'implantation des caméras de Saint-Ulric, relevé photographique héliporté de septembre 2010



Figure 56. Prise de vue d'une portion du site suivi par le MTQ D0202 sur le segment d'analyse de Saint-Ulric, relevé photographique héliporté de septembre 2010



Figure 57. Vue générale du segment d'analyse de Saint-Ulric, relevé photographique héliporté de septembre 2010

La côte fait face au nord-ouest et les terrasses de plage constituent 97,09 % du littoral du segment d'analyse. Au total, 11,89 % du littoral y est artificialisé (tableau 13). Le haut estran est sableux et le bas estran est formé d'une plateforme rocheuse d'une largeur de 200 à 300 m sur laquelle reposent çà et là des blocs. La position de la flexure correspond ici à la limite entre le sable et la plate-forme. La largeur du haut estran est en moyenne de 17,27 m, atteint au maximum 25,85 m et est réduite au minimum à 10,96 m (tableau 14). Le volume moyen du haut estran est de 0,91 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.

	Type de côte (%)					
État de la côte et artificialité	Terrasse de plage	Terrasse de plage à base rocheuse	Rocheuse sans falaise	Total		
Active / Vive (- de 25 % végé.)	36,84	0	0	36,84		
Sans artificialité	32,01	0	0	32,01		
Avec artificialité	4,83	0	0	4,83		
Semi-végétalisée (entre 25 et 75% végé.)	27,02	0	0	27,02		
Sans artificialité	23,91	0	0	23,91		
Avec artificialité	3,11	0	0	3,11		
Stable / Végétalisée (+ de 75 % végé.)	33,23	1,35	1,56	36,14		
Sans artificialité	30,18	0,45	1,56	32,19		
Avec artificialité	3,05	0,90	0	3,95		
Total	97,09	1,35	1,56	100		

Tableau 13. Caractéristiques des côtes du segment d'analyse de Saint-Ulric(2010)

Source : LDGIZC, Trait de côte de l'est du Québec numérisé à l'écran et caractérisé par la Chaire de recherche en géoscience côtière d'après les photographies obliques héliportées de septembre 2010 et des validations terrain

	Altitude de la flexure (m)	Altitude de la ligne de rivage (m)	Largeur du haut estran (m)	Pente (%)	Volume (m³/m²)
Minimum	0,21	2,13	7,17	7,68	0,30
Maximum	1,76	3,25	25,85	13,70	3,38
Moyenne	0,71	2,64	16,90	11,40	0,92
Écart-type	0,30	0,22	3,20	1,05	0,42

Tableau 14. Caractéristiques morphologiques du haut estran du segmentd'analyse de Saint-Ulric

Source : LDGIZC, Lidar 2009 pour MSP

### 7.1.2. Suivi par MTQ, Saint-Ulric

À l'intérieur de la cellule hydrosédimentaire, on compte 10 sites suivis par le MTQ, lesquels totalisent 5512,5 m de côte (D0100, D0101, D0102, D0104, D0105, D0106, D0201, D0202, D0203, D0204). Les tronçons D0202, D0203, D0204, totalisant 2472 m de segments routiers, sont à l'intérieur du segment d'analyse. Les cartes de dynamique hydrosédimentaire (no 19), d'exposition à l'érosion (no 19), d'exposition à la submersion (no 19) et d'exposition des sites suivis à l'érosion (no 29 et no 30) et à la submersion (no 29 et no 30) ont été fournies dans le cadre du projet X008.1 (Drejza et al., 2014).

# 7.1.3. Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), Saint-Ulric

Sur le haut estran du site de Saint-Ulric, le pied de glace se forme essentiellement sur la portion inférieure du haut estran par le battement des marées et grâce à l'apport en frasil de même qu'en petits glaçons de glace formée sur la plate-forme rocheuse. La zone de formation régulière du pied de glace de haut estran observée durant les années de suivi s'établit à 75 %. Dans la portion supérieure du haut estran, la glace s'accumule seulement ponctuellement, c'est-à-dire lorsque le niveau d'eau total à la côte le permet (niveau d'eau + runup). Notons que de la glace peut aussi s'y accumuler momentanément durant le déglacement lorsque les radeaux de glaces à la dérive s'y échouent. Sous des conditions météo-marines atypiques, les modes de formation du pied de glace peuvent être différentes de ceux observés la plupart du temps. Par exemple, durant la saison 2012-2013, et plus spécifiquement en janvier 2013, sous l'effet du démantèlement presque complet des pieds de glace de haut estran et de bas estran, le pied de glace de haut estran a été reconstitué par l'accumulation de radeaux de glace. Enfin, comme sur la plupart des autres sites, dès que le pied de glace de bas estran est établi, la formation du pied de glace de haut estran est, pratiquement, interrompue.

Tel qu'indiqué plus haut, le bas estran de Saint-Ulric est une large plate-forme rocheuse. En plus de contribuer à réduire l'énergie des vagues (Stephenson et Kirk, 2000), cette plate-forme est aussi une zone favorable à la formation de glace. Contrairement à la plupart des sites d'étude, la saison glacielle débute souvent sur le bas estran d'abord et quelques jours plus tard sur le haut estran. L'eau qui reste prise dans les dépressions sur la plate-forme refroidit rapidement et permet à la glace de s'y former. On observe que la marée descendante permet la formation de glace alors que la marée montante entraîne la dégradation de la glace alors que le haut estran peut être encore libre de glace (figure 58). La topographie irrégulière de la plate-forme est également favorable à la stabilité du pied de glace de bas estran puisque le mouvement de la glace est limité, en partie, par les aspérités de la plateforme. Les vents dominants qui soufflent vers le littoral assurent un apport en glace de mer qui, poussée contre la côte, contribue aussi à la stabilité du pied de glace de bas estran de même que du haut estran indirectement. Aussi, il apparaît que la croissance verticale du pied de glace de bas estran est suffisamment importante pour permettre à la glace de s'ancrer sur la plateforme localement. L'ensemble de ces conditions favorisent aussi l'empilement de glace à la limite inférieure de la plate-forme (figure 59). En phase de déglacement, la hausse des températures de l'air et l'augmentation de

l'intensité du rayonnement fragilisent la glace. Les marées et les vagues entraînent le morcellement du pied de glace de bas estran et l'évacuation de la glace est généralement assez rapide (aussi peu qu'un cycle de marée parfois). Par contre, il n'est pas impossible que des radeaux de glace, mobilisés à partir de site en amont (à l'ouest de Saint-Ulric), s'accumulent de nouveau sur la plate-forme lors de la phase de dégel. La figure 60 résume les observations de l'état d'englacement et du niveau de protection assuré par la glace devant les caméras de Saint-Ulric durant la période de suivi.



Figure 58. Englacement à marée basse sur le bas estran et haut estran et haut estran essentiellement libre de glace (1) suivi par le déglacement à marée haute (2) lassant place à une plate-forme essentiellement libre de glace (la neige blanchit la plate-forme et le haut estran : il n'y a pas de glace ou alors très peu) sur le site de Saint-Ulric



Figure 59. Empilement de glace à la limite inférieure de la plate-forme, 9 février 2012, Saint-Ulric



\*Moyenne des caméras Est et Ouest

Figure 60. Saison glacielle, état d'englacement et niveau de protection verticale assurée par la glace de haut et de bas estran, Saint-Ulric

# 7.1.4. Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, Saint-Ulric

Sur le site de Saint-Ulric, la mise en relation des déplacements négatifs avec les conditions hydrodynamiques et glacielles a été effectuée à l'aide des données de 27 stations de suivi.

Sur le site de Saint-Ulric (figure 61), le niveau d'eau seul (WLEV) permet déjà d'expliquer en partie les déplacements négatifs mesurés à la côte (R<sup>2</sup> de 0,46). On constate que la relation s'améliore légèrement si l'on considère les niveaux d'eau effectifs seulement (niveau d'eau lorsque l'indice de protection verticale de la glace d'estran est de 0,5 et moins) (R<sup>2</sup> de 0,49). Le R<sup>2</sup> de la relation entre le niveau d'eau total à la côte (composé du niveau d'eau et du runup) grimpe, pour sa part, à 0,98 en excluant ou en incluant l'effet de protection par la glace. Les prédictions du modèle «WLEV+RUNUP effectif », qui intègre le niveau d'eau, le runup (donc les vagues) et la protection par glace (effectif), présentent une erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error*, RMSE) de 0,2021 m.

Cependant, ce modèle ne permet pas d'expliquer les déplacements négatifs inférieurs à 1 m. Plus exactement, ceux pour lesquels les valeurs sont faibles et comprises entre 0 m et 0,25 m présentent, elle aussi, une relation positive lorsque nous répétons la démarche pour ces seules valeurs. Les R<sup>2</sup> obtenus sont ici beaucoup plus faibles, mais les relations demeurent tout de même positives et les valeurs sont mieux réparties le long de la droite de régression. Aussi, chaque fois que la protection par la glace est intégrée, on observe une augmentation de la valeur du R<sup>2</sup>.

Les déplacements négatifs moyens annuels mesurés et les régressions linéaires sont tributaires de la dynamique du littoral du segment d'analyse. En effet, celui-ci est généralement assez stable et subit des reculs presque exclusivement lors des évènements extrêmes. En conséquence, le seuil optimal trouvé est très élevé et le nombre d'heures de dépassement observé annuellement a été très faible avec tout au plus 2 heures durant l'année où le recul a été le plus sévère. En raison de cette caractéristique, l'effet de protection (par rehaussement topographique) de la glace contre le recul de la côte au cours de la période 2004-2015 a été nul puisque le seuil optimal n'a jamais été dépassé durant la saison glacielle modélisée. En effet, le seuil optimal a été dépassé 1 heure le 16 octobre 2004 (hors saison glacielle modélisée et « normale PR ») et 2 heures le 6 décembre 2010 (hors saison glacielle modélisée et « normale PR »). Notons que les dates identifiées par les données de modèle coïncident effectivement avec les dates tirées des
documents d'archives (dates des évènements ayant causé des dommages à la côte) (Bernatchez et al., 2012a). Même si la protection par la glace avait été au moins équivalente à la normale théorique, les évènements de recul potentiel se trouvaient toujours en dehors de la période glacielle.



Figure 61. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Saint-Ulric



Figure 62. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Saint-Ulric, sans les valeurs extrêmes

Année glacielle	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Nombre d'heures où le NETC a été supérieur au seuil optimal durant l'année	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
Nombre d'heures où le NETC a été supérieur au seuil optimal durant la saison glacielle	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nombre d'heure où le NETC effectif a été supérieur au seuil optimal	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
Ratio de protection (%)	n.a	0.00	n.a	n.a	n.a	n.a	0.00	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
Déplacement négatif moyen annuel observé (m)	0.19	2.58	0.01	0.05	0.01	0.73	4.52	0.08	0.24	0.05	0.02	0.01
Déplacement négatif moyen annuel prédit (modélisé) (m)	0.15	2.38	0.15	0.15	0.15	0.15	4.62	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Différence entre « observé » et « modélisé » (m)	-0.05	-0.19	0.14	0.10	0.14	-0.58	0.10	0.07	-0.09	0.10	0.13	0.14
Recul prédit si l'on enlève l'effet de protection par la glace (m)	0.15	2.38	0.15	0.15	0.15	0.15	4.62	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Augmentation conséquente (m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Augmentation conséquence (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## Tableau 15. Évaluation de l'effet de protection offert par la glace durant la période 2004-2015 pour le site de Saint-Ulric

# 7.1.5. Évaluation des reculs négatifs pour l'horizon 2055

Malgré les limites précédemment énoncées, il est possible d'utiliser les relations trouvées, celles incluant les valeurs extrêmes (figure 63), pour estimer l'effet de la diminution de l'englacement sur l'évolution négative de la côte pour l'horizon 2055.

Le nombre d'heures où le NETC a atteint ou dépassé le seuil optimal a été seulement de 0 à 2 heures pour toute la période comprise en 2004 et 2015 (tableau 15). La valeur du seuil optimal trouvé correspond donc à des évènements énergétiques relativement rares et qui ne surviennent pas chaque année. Ainsi, pour la période 1981-2010, le nombre d'heures par an où le NETC est plus grand ou égal au seuil optimal est en moyenne de 0,03 h (figure 63). En incluant l'effet de protection de la glace de haut et de bas estran (NETC effectif), ce nombre s'élève aussi à 0,03 h. Pour l'horizon 2055, le nombre d'heures où le NETC est plus grand ou égal au seuil optimal est de 0,59 h. En incluant l'effet de protection par la glace, ce nombre s'élève à 0,55 h. L'influence de l'évolution des conditions glacielles n'est donc pas très importante comparativement à l'augmentation de l'énergie des vagues prévue pour l'horizon 2055.

Contrairement à d'autres sites d'étude, les résultats de Saint-Ulric indiquent que l'effet de protection de la glace contre l'érosion latérale de la côte sera à la hausse pour l'horizon 2055. En effet, pour le passé récent, le nombre d'heures de protection était en moyenne de 0,00 h par an (figure 63). Pour l'horizon 2055, ce nombre passe à 0,03 h par an. Pourtant, comme ailleurs, l'englacement de la côte est à la baisse. Néanmoins, la hausse de la fréquence des évènements extrêmes permet à la glace d'assurer, plus souvent que par le passé, son rôle de protection.

L'augementation des valeurs de déplacement mesuré annuellement est attribuable à l'augmentation de l'énergie des vagues prévue pour l'horizon 2055. Alors que ces valeurs étaient, selon les simulations et modèles, en moyenne de 0,22 m annuellement pour le passé récent, elles devraient augmenter de 516 % pour s'établir à 1,38 m/an (figure 63). Les limites de l'étude ne permettent pas d'intégrer la vitesse de rétablissement de la côte. Néanmoins, en gardant en perspective cette limite, on comprend que, toutes choses étant égales par ailleurs, le recul de la côte devrait s'accentuer.



Figure 63. Évolution du NETC et de l'érosion entre le passé récent et l'horizon 2055, Saint-Ulric

# 7.1.6. Dynamique d'évolution des terrasses de plage de Saint-Ulric

À l'échelle historique, les terrasses de plage (sans artificialité) ont été relativement stables en évoluant à une vitesse moyenne de 0,08 m/an entre 1948 et 2012 (figure 64). Les vitesses de recul les plus rapides ont généralement été inférieures aux vitesses d'avancée les plus rapides (-0,65 m/an vs +0,88 m/an). L'évolution moyenne des deux derniers intervalles (entre 1985 et 2012) a été négative (-0,18 m/an et -0,11 m/an). L'analyse sommaire des données d'évolution côtière indique qu'il s'agit d'une côte qui a été assez résiliente, et ce, malgré l'occurrence d'évènements érosifs majeurs.

À l'échelle de la période 2003-2015, les mesures annuelles prises aux 27 stations de suivi retenues pour ce segment d'analyse indiquent que la côte a évolué à un rythme moyen de -0,49 m/an (figure 64). En excluant les reculs sévères de la tempête de décembre 2010, le recul s'est effectué au rythme de -0,21 m/an. Les reculs ponctuels mesurés à la suite de la tempête du 6 décembre 2010 ont varié entre -3,3 m et -9,3 m (7 mesures) ; signe que la côte est sensible aux évènements de tempête majeure. Notons au passage que l'évènement du 6 décembre 2010 s'est produit en dehors de la saison glacielle « normale » modélisée pour le passé récent (début de la saison glacielle sur le haut estran : 10 décembre).

Enfin, tel qu'indiqué à la section précédente, les simulations et modèles indiquent que les déplacements négatifs auraient été en moyenne de 0,22 m annuellement pour le passé récent (1981-2010) et de 1,38 m pour l'horizon 2055 (2041-2070) (figure 63 et figure 64). La vitesse moyenne des déplacements négatifs annuels modélisés pour l'horizon 2055 est plus sévère que toutes les vitesses ayant pu être observées jusqu'à maintenant.

#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES



\*Les années multiples, par exemple 1985(86), indique que l'année d'acquisition n'est pas la même pour toutes les photos. Source : D'après les données produites par Drejza et al., 2015

Figure 64. Vitesse de déplacement de la ligne de rivage d'après les analyses historiques, moyennes des déplacements négatifs mesurées à partir des stations de suivi et simulées, Saint-Ulric

# 7.1.7. Rôle de la glace et perspectives d'évolution

#### Mise en perspective des modèles

Bien que les modèles développés ici soient encore trop simples pour tenir compte de toute la complexité du système côtier du site d'étude (les modèles n'expliquent pas les déplacements négatifs de moins de 1 m, section 7.1.4), il a été possible de modéliser l'influence des évènements érosifs majeurs sur l'évolution de la côte. Comme la dynamique côtière du site de Saint-Ulric est en grande partie liée aux évènements majeurs, les modèles ont pu être utilisés pour simuler les vitesses moyennes des déplacements pour le passé récent et pour l'horizon 2055.

#### Rôle de la glace

Selon ces résultats, la glace d'estran n'est pas un élément majeur dans la protection de la côte contre l'érosion par les agents hydrodynamique. Au cours de la période récente, les évènements hydrodynamiques les plus énergétiques ne se sont pas produits durant la saison glacielle, ni même durant la saison glacielle « normale » modélisée pour le passé récent (section 7.1.4). Par contre, sous l'effet de l'augmentation de l'énergie des vagues attendues pour l'horizon 2055, le rôle de protection de la glace sera légèrement à la hausse, et ce, même si le nombre de jours où la glace est suffisamment développée pour assurer une protection est à la baisse.

## Perspectives d'évolution côtière pour l'horizon 2055

La valeur des déplacements négatifs simulée pour l'horizon 2055 (-1,38 m/an) est très élevée par rapport aux vitesses de déplacement ayant été mesurées par le passé (section 7.1.6). Il apparaît peu probable que les vitesses de rétablissement de la côte soient suffisantes pour assurer la stabilité relative observée historiquement. En raison, seulement, de l'augmentation de l'énergie des vagues en direction de la côte (section 7.1.5), une tendance à l'érosion est donc à prévoir pour le site de Saint-Ulric, toutes choses étant égales par ailleurs.

## Infrastructures routières

Actuellement, plusieurs tronçons routiers sont en imminence face au risque d'érosion ou exposé d'ici 2030-2040 (Drejza et al., 2014). Une réanalyse du risque d'exposition qui tiendrait compte des résultats du présent projet aurait pour effet d'augmenter la longueur des tronçons exposés et de réduire l'horizon à partir duquel ils le sont.

Selon Drejza et al. (2014), les tronçons routiers analysés ne sont pas à risque de submersion sauf très localement où la présence d'ouvrages de protection côtière rend possible la submersion par franchissement. Les changements importants des conditions de vagues au large de ce site pourraient faire en sorte d'augmenter le risque de submersion (section 6).

# 7.2. Rivière-à-Claude

## 7.2.1. Description du segment d'analyse de Rivière-à-Claude

Le site témoin de Rivière-à-Claude, situé sur la rive nord de la péninsule gaspésienne, appartient à la cellule hydrosédimentaire de Rivière-à-Claude (7,6 km) (figure 65). Le courant de dérive principale s'y effectue vers l'ouest. Les données de marnage de la station marégraphique la plus proche sont celles de Mont-Louis (2920) et sont compilées à l'annexe K. Le marnage y varie entre 2,1 m (marée moyenne) et 3,0 m (grande marée).

Le segment d'analyse de Rivière-à-Claude est localisé dans l'anse de la rivière du même nom et mesure 1408 m (figure 66). L'anse fait face au nord. Le segment a été suivi à l'aide d'une caméra en place entre 2011 et 2015 (figure 67).



Tirée de Drejza et al., 2014, l'étoile indique la position de la caméra

Figure 65. Cellule hydrosédimentaire de Rivière-à-Claude



Figure 66. Délimitation du segment d'analyse de Rivière-à-Claude



Figure 67. Prise de vue à la caméra à Rivière-à-Claude HYDRO

Le segment d'analyse est exclusivement constitué de terrasses de plage. Celles-ci sont actives à 30,58 %, semi-végétalisées à 22,75 % et stables à 46,67 % (tableau 16). Sur l'ensemble du segment d'analyse, 27,12 % sont artificialisées. L'anse de Rivière-à-Claude est ouverte sur le golfe du Saint-Laurent et on retrouve trois autres anses d'une morphologie similaire à celle de Rivière-à-Claude dans ce secteur. Il s'agit des anses de Mont-Saint-Pierre, de Mont-Louis, et de l'anse Pleureuse de Saint-Maxime-du-Mont-Louis. Le haut estran de l'anse de Rivière-à-Claude est composé de sable, graviers et galets. La largeur moyenne est de 35,99 m, d'au moins 10,16 m et d'au plus 48,43 m (tableau 17). Le volume des plages varie entre 0,81 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> et 1,71 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> et est en moyenne de 1,32 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Le bas estran est constitué d'une plate-forme rocheuse. On observe, tout juste en bas de la flexure, la présence de blocs (assez angulaires) (figure 68). Des corps sédimentaires sableux sont parfois visibles et évoluent selon les conditions hydrodynamiques.

	Type de côte (%)	
	Terrasse de plage	Total
Active ou vive ( - de 25% végé.)	30,58	30,58
Sans artificialité	29,18	29,18
Avec artificialité	1,40	1,40
Semi-végétalisée (entre 25 et 75% végé.)	22,75	22,75
Sans artificialité	22,75	22,75
Avec artificialité	0	
Stable ou végétalisée (+ de 75% végé.)	46,67	46,67
Sans artificialité	20,96	20,96
Avec artificialité	25,72	25,72
Total	100	100

Tableau 16. Caractérisation du	segment d'analyse de	Rivière-à-Claude (2010	J)
--------------------------------	----------------------	------------------------	----

Source : LDGIZC, Trait de côte de l'est du Québec numérisé à l'écran et caractérisé par la Chaire de recherche en géoscience côtière d'après les photographies obliques héliportées de septembre 2010 et des validations terrain

# Tableau 17. Caractéristiques morphologiques du haut estran du segment d'analyse de Rivière-à-Claude

	Altitude de la flexure (m)	Altitude de la ligne de rivage (m)	Largeur du haut estran (m)	Pente (%)	Volume (m³/m²)
Minimum	-0,74	1,62	10,16	4,92	0,81
Maximum	0.55	2,66	48,43	14,48	1,71
Moyenne	-0,46	2,27	35,99	8,14	1,32
Écart-type	0,42	0,33	9,84	2,50	0,31

Source : LDGIZC, Lidar 2009



Figure 68. Bas estran découvert à marée basse

## 7.2.2. Suivi par le MTQ, Rivière-à-Claude

La route 132 qui longe les versants entre les anses est suivie sur presque toute sa longueur entre La Martre et Saint-Maxime-du-Mont-Louis. À l'intérieur du segment d'analyse, le tronçon de route C0501 S3 (80 m) est suivi par le MTQ. Les cartes de dynamique hydrosédimentaire (n° 30), d'exposition à l'érosion (n° 29), d'exposition à la submersion (n° 29) et d'exposition des sites suivis à l'érosion (n° 50) et à la submersion (n° 50) ont été fournies dans le cadre du projet X008.1 (Drejza et al., 2014).

# 7.2.3. Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), anse de Rivière-à-Claude

Le visionnement des images montre que le site est caractérisé par un climat de vagues énergétiques (figure 69). La zone de battement de marée est assez large en raison du marnage et du climat de vagues. En conséquence, la zone de formation régulière du pied de glace de haut estran est elle aussi assez large et a été évaluée à 85 % du haut estran.





Durant la période d'englacement, les conditions hydrodynamiques sont favorables au développement du pied de glace de haut estran par accumulation de frasil. Aussi, on observe que ces conditions sont propices à l'intégration de sédiments dans le pied de glace (figure 70). Lorsque les vagues viennent frapper sur le front du pied de glace et qu'elles sont chargées de sédiments, ceux-ci s'accumulent sur la surface de la glace. Si les vagues sont chargées de frasil ou de glaçons ou de sarrasins, il aura croissance verticale du pied de glace. Au cours de la saison 2012-2013, l'englacement du

haut s'est effectué presque d'un seul coup le 3 janvier 2013 (accumulation de frasil). Le front du pied de glace ainsi formé était en haut de la flexure et les eaux côtières étaient encore libres de glace. D'après les observations réalisées au LDGIZC, cette configuration serait vraisemblablement une des plus favorables à l'abaissement de la plage par affouillement (effet de structure rigide).



Figure 70. Accumulation de sédiments en surface du pied de glace de haut estran, 13 mars 2013, anse de Rivière-à-Claude

La quantité de glace produite directement dans l'anse apparaît plutôt limitée (peu d'observation de développement de glace nouvelle glace jusqu'au stade de glace blanche directement sur les eaux visibles à partir de la caméra). Il semble que la glace de mer qui circule dans l'anse est surtout formée en dehors de celle-ci. Il a été observé à la caméra Est (localisée à l'extérieur de l'anse) que des bandes de glace circulent le long des côtes. Ce sont vraisemblablement ces glaces qui entrent dans l'anse. Une analyse synoptique serait nécessaire pour pouvoir mieux décrire la circulation de la glace de mer entre les zones rectilignes de la côte et les anses. Une fois la

glace accumulée et consolidée dans l'anse, on peut parler de banquise côtière puisque celle-ci est généralement stable (peu ou pas de mouvement latéral). En ce sens, la dynamique du pied de glace de bas estran est étroitement liée à la dynamique de la glace de mer qui circule et s'accumule dans l'anse. On observe alors que le pied de glace de bas estran s'élève et s'abaisse au front du pied de glace de haut estran. Lorsque l'anse a été englacée durant l'hiver, le déglacement s'effectue, bien sûr, du large vers la côte. Cependant, de manière générale, le déglacement n'est pas progressif; toute la glace, mis à part le pied de glace de haut estran, est évacuée pratiquement en même temps. Durant le déglacement, une partie du pied de glace de haut estran est ensuite démantelé grâce à l'énergie thermique et mécanique des vagues. La partie la plus haute du pied de glace, par contre peut, fondre sur place si les conditions hydrodynamiques qui prévalent durant le déglacement sont plutôt calmes. La figure 71 résume les observations de l'état d'englacement et du niveau de protection assuré par la glace devant les caméras de Rivière-à-Claude durant la période de suivi.



\*Moyenne des caméras Est, Ouest et Hydro

Figure 71. Saison glacielle, état d'englacement et niveau de protection verticale assurée par la glace de haut et de bas estran, Rivière-à-Claude

# 7.2.4. Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, Rivière-à-Claude

Sur le site de Rivière-à-Claude, on compte 9 stations de suivi pouvant être utilisées pour mettre en relation les mesures de déplacements négatifs avec les conditions hydrodynamiques et glacielles et pour lesquelles les mesures ont été effectuées entre 2007 et 2015.

Les R<sup>2</sup> des relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques et glaciels sont plutôt faibles si l'on considère seulement le niveau d'eau sans et avec la glace (R<sup>2</sup> de 0,38 et 0,32). Par contre en intégrant le runup, les R<sup>2</sup> trouvés grimpent à 0,97 et 0,95 (figure 72). On observe une fois de plus que les relations sont dirigées par les valeurs extrêmes et qu'il est difficile d'expliquer l'évolution négative de la côte pour les déplacements négatifs moyens annuels de moins de 1 m environ. En excluant les valeurs extrêmes, les relations trouvées sont négatives et donc incohérentes (figure 73).

Malgré les limites décrites ici, il est possible d'utiliser les relations trouvées (relations incluant les valeurs extrêmes) (figure 146). Plus exactement, c'est la relation qui inclut le niveau d'eau, les vagues et l'englacement à la côte (Runup+WLEV effectif) qui est utilisée pour estimer l'effet de protection offert par la glace durant l'intervalle 2007-2015 (tableau 18). D'abord, la protection offerte par la glace est extrêmement variable en fonction des conditions hydrodynamique (plus ou moins d'heures supérieures au seuil optimal) et en fonction des conditions d'englacement (plus où moins d'heures de protection). Conséquemment, le ratio de protection va de 0 % à 100 %. S'il n'y avait pas eu de glace d'estran durant ces 9 années, le déplacement négatif moyen annuel aurait, théoriquement, subi une hausse comprise entre 0 % à 53 % et entre 0 m à 0,78 m.

Tableau 18.	Évaluation	de l'effet (	de protection	offert par	la glace	durant la	période	2007-2015	pour le site	de Rivière-
Claude										

Variables	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Nombre d'heures où le NETC a été supérieur au seuil optimal durant l'année	0	7	1	1	14	0	0	0	1
Nombre d'heures où le NETC a été supérieur au seuil optimal durant la saison glacielle	0	3	0	1	2	0	0	0	0
Nombre d'heure où le NETC effectif a été supérieur au seuil optimal	0	4	1	0	12	0	0	0	1
Ratio de protection (%)	na	42,9	0,0	100	14,3	na	na	na	0
Déplacement négatif moyen annuel observé (m)	0,70	1,16	0,15	0,43	3,43	0,07	0,23	0,26	0,33
Déplacement négatif moyen annuel prédit (modélisé) (m)	0,23	1,27	0,49	0,23	3,35	0,23	0,23	0,23	0,49
Différence entre « observé » et « modélisé » (m)	-0,47	0,11	0,34	-0,20	-0,08	0,16	0,00	-0,03	0,16
Recul prédit si l'on enlève l'effet de protection par la glace (m)	0,23	2,05	0,49	0,49	3,87	0,23	0,23	0,23	0,49
Augmentation conséquente (m)	0	0,78	0	0,26	0,52	0	0	0	0
Augmentation conséquence (%)	0	38,05	0	53,07	13,44	0	0	0	0



Figure 72. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Rivièreà-Claude



Figure 73. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Rivièreà-Claude, sans les valeurs les extrêmes

# 7.2.5. Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055, Rivière-à-Claude

Malgré les limites précédemment énoncées, il est possible d'utiliser les relations trouvées, celles incluant les valeurs extrêmes (figure 72), pour estimer l'effet de la diminution de l'englacement sur l'évolution négative de la côte pour l'horizon 2055.

Selon les résultats obtenus, nous avons vu que le nombre d'heures où la hauteur des vagues est supérieure au 95<sup>e</sup> percentile du passé récent au large de Rivière-à-Claude sera fortement à la hausse (figure 39). Conséquemment, le nombre d'heures où le NETC sera supérieur au seuil optimal (2,30) défini par la relation linéaire sera lui aussi à la hausse. Avec une moyenne annuelle d'un peu plus de 2 h/an en 1981-2010 et de 6 h/an en 2041-2070, la hausse attendue est de l'ordre de 152 %. Sous l'effet de la diminution de l'englacement, le nombre d'heures où le NETC est effectif subit une hausse. Il passe d'un peu moins de 2 h/an à plus de 5 h/an (hausse de 218 %). Dans de telles conditions, les valeurs de déplacements négatifs moyens annuels devraient passer, selon les modèles utilisés ici, de 0,68 m à 1,65 m. Ceci correspond à une augmentation de 144 %.



Figure 74. Évolution du NETC et de l'érosion entre le passé récent et l'horizon 2055, Rivière-à-Claude

# 7.2.6. Dynamique d'évolution des terrasses de plage de Rivière-à-Claude

Les terrasses de plage de fond de baie de Rivière-à-Claude ont un taux de migration moyen historique (1948-2009) presque nul (0,04 m/an) (d'après les données d'évolution historique réalisées pour Drejza et al. (2014). Celles-ci connaissent tout de même des périodes d'avancées et de reculs (figure 75) durant la période historique avec des moyennes variant entre -0,26 m/an et 0,53 m/an. Localement, la vitesse de recul la plus rapide ayant été mesurée a été de l'ordre de -1,63 m/an (1977-1986) et inversement, la vitesse d'avancée la plus rapide de +2,05 m/an (1963-1977).

Durant les années 2003-2015, les stations de suivi implantées dans l'anse de Rivière-à-Claude ont permis de mesurer un déplacement annuel moyen de -0,41 m/an (valeurs positives et négatives) ou de -0,71 m (valeurs négatives seulement, valeur positive à 0). Ainsi, les données des stations de suivi indiquent que la stabilité observée historiquement pourrait déjà n'appartenir qu'au passé. Les données des stations de suivi montrent que l'anse est sensible aux évènements de tempêtes. Sous l'effet des tempêtes de 2010-2011 (décembre 2010 particulièrement), le recul moyen mesuré dans l'anse avait été de -3,4 m.

Enfin, tel qu'indiqué à la section précédente, les simulations et modèles indiquent que les déplacements négatifs auraient été en moyenne de 0,68 m annuellement pour le passé récent (1981-2010) et de 1,65 m pour l'horizon 2055 (2041-2070) (figure 74 et figure 75). La vitesse moyenne des déplacements négatifs annuels modélisés pour l'horizon 2055 est plus sévère que les vitesses de recul ayant pu être observées jusqu'à maintenant et s'apparente à la vitesse de recul maximale (mesure locale) captée pour l'intervalle 1977-1986.

#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES



Figure 75. Vitesse de déplacement de la ligne de rivage d'après les analyses historiques, moyennes des déplacements négatifs mesurées à partir des stations de suivi et simulées, Rivière-à-Claude

# 7.2.7. Rôle de la glace et perspectives d'évolution

#### Mise en perspective des modèles

Bien que les modèles développés ici soient dirigés par les valeurs extrêmes et qu'il est difficile d'expliquer l'évolution négative de la côte pour les déplacements négatifs moyens annuels de moins de 1 m environ (section 7.2.4), il a été possible de modéliser l'influence des évènements érosifs majeurs sur l'évolution de la côte. Comme la dynamique côtière du site de Rivière-à-Claude est en partie liée aux évènements majeurs, les modèles ont pu être utilisés pour simuler les vitesses moyennes des déplacements pour le passé récent et pour l'horizon 2055.

#### Rôle de la glace

La protection assurée par le développement de la glace de haut et de bas estran contre l'érosion à la côte par les agents hydrodynamique a varié fortement durant l'intervalle 2007-2015 en fonction des conditions hydrodynamiques et glacielles (section 7.2.4).

#### Perspectives d'évolution côtière pour l'horizon 2055

La valeur des déplacements négatifs simulée pour l'horizon 2055 (-1,65 m/an) est très élevée par rapport aux vitesses de déplacement ayant été mesurées par le passé (section 7.2.6). Il apparaît peu probablement que les vitesses de rétablissement de la côte soient suffisantes pour assurer la stabilité relative observée historiquement. En raison de l'augmentation de l'énergie des vagues en direction de la côte (section 5) et de la diminution de l'englacement (section 6), une tendance à l'érosion est donc à prévoir pour le site de Rivière-à-Claude, toutes choses étant égales par ailleurs.

#### Infrastructures routières

À l'extérieur de l'anse, la route 132 est construite directement sur le littoral et protégée par des enrochements (Drejza et al., 2015). En l'absence de plage à la base des infrastructures, l'énergie des vagues arrivant à la côte n'est pas atténuée. On sait aussi que les structures rigides augmentent la sensibilité des côtes au phénomène de submersion (Bernatchez et al., 2011). La diminution de l'englacement et les changements au climat de vagues pourraient accroître l'occurrence et l'intensité des évènements de submersion le long de la route près de Rivière-à-Claude.

# 7.3. Penouille 1-3

## 7.3.1. Description du segment d'analyse de Penouille 1-3

Le site témoin de Penouille 1-3 appartiennent à la cellule hydrosédimentaire du même nom (figure 76 et figure 77). Localisé dans la baie de Gaspé, le littoral s'y étire sur 20,6 km et les dérives principales convergent vers la flèche de Penouille. Les données de marnage de la station marégraphique la plus proche sont celles de Gaspé (2320) et sont compilées à l'annexe K. Le marnage y est de l'ordre de 1,2 m (marée moyenne) à 1,7 m (grande marée).

En raison des conditions différentes rencontrées sur la flèche, notamment en raison de l'orientation de la côte, deux segments d'analyses distincts sont considérés pour ce site témoin. Le premier segment d'analyse de Penouille, soit Penouille 1-3, d'une longueur de 2018 m, est localisé sur le littoral sud de la flèche (le littoral est orienté face au sud-sud-est) (figure 78). Ce segment est suivi à l'aide de deux caméras durant la période 2010-2015 (figure 79 et figure 80).



Tirée de Drejza et al., 2014, les étoiles indiquent la position des caméras

Figure 76. Cellule hydrosédimentaire de Penouille (1/2)



Tirée de Drejza et al., 2014, les étoiles indiquent la position des caméras

Figure 77. Cellule hydrosédimentaire de Penouille (2/2)



Figure 78. Délimitation des segments d'analyse de Penouille



Figure 79. Prise de vue à la caméra Penouille 1



Figure 80. Prise de vue à la caméra Penouille 3

Devant le premier segment d'analyse, la dérive principale s'effectue vers l'ouest. Le littoral est une flèche où l'on compte 10,02 % d'artificialité. Le littoral est en majorité actif (60,14 %) et en partie semi-végétalisé (38,86 %) (tableau 19). Le haut estran est composé de sable moyen et grossier et est large de 15 m en moyenne (Bernatchez et al. 2013). Le bas estran est également sableux et la proportion de sable fin est ici plus importante que sur le haut estran (Bernatchez et al. 2013). Devant le littoral sud-est de la flèche, on observe la présence de cordons sableux orientés parallèlement à la côte. Ceux-ci migrent vers la côte lors de tempêtes exceptionnelles (Bernatchez et al. 2013).

	Type de côte (%)	
État de la côte et artificialité	Flèche littorale	Total
Active ou vive ( - de 25% végé.)	61,14	61,14
Sans artificialité	51,12	51,12
Avec artificialité	10,02	10,02
Semi-végétalisée (entre 25 et 75% végé.)	38,86	38,86
Sans artificialité	38,86	38,86
Avec artificialité	0	0
Total	100	100

Tableau 19. Caractérisation	du segment d'analyse	de Penouille 1-3 (2010)
-----------------------------	----------------------	-------------------------

Source : LDGIZC, Trait de côte de l'est du Québec numérisé à l'écran et caractérisé par la Chaire de recherche en géoscience côtière d'après les photographies obliques héliportées de septembre 2010 et des validations terrain

	Altitude de la flexure (m)	Altitude de la ligne de rivage (m)	Largeur du haut estran (m)	Pente (%)	Volume (m <sup>3</sup> /m²)
Minimum	-0,36	1,11	11,64	8,78	Nd
Maximum	0,64	2,28	18,59	12,19	Nd
Moyenne	0,06	1,65	15,23	10,48	Nd
Écart-type	0,32	0,37	1,78	1,20	Nd

# Tableau 20. Caractéristiques morphologiques du haut estran du segmentd'analyse de Penouille 1-3

Source : LDGIZC, Lidar 2008, profil de plage pour le projet Penouille, Parc Canada

# 7.3.2. Suivi par le MTQ, Penouille 1-3

Les cartes de dynamique hydrosédimentaire (n° 41 et n° 42), d'exposition à l'érosion (n° 41 et n° 42), d'exposition à la submersion (n° 41 et n° 42) de ce site témoin ont été fournies dans le cadre du projet X.008.1 (Drejza, 2014) (figure 76 et figure 77). Il n'a y aucune route suivie par le MTQ pour ce site témoin.

# 7.3.3. Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), Penouille 1-3

Sur le site de Penouille 1-3, c'est-à-dire sur le littoral de Penouille qui fait face au sud-est, on constate, d'après la visualisation des images de caméras, que les vagues à la côte sont généralement peu énergétiques. La localisation de Penouille à l'intérieur de la baie de Gaspé explique en grande partie cette observation (fetch nord-sud très court d'environ 5 km, fetch plus long seulement dans l'axe de la baie, soit l'axe sud-est vers nord-ouest) (figure 76 et figure 77). De plus, une partie des vagues déferle sur les barres sableuses d'avant côte (barres visibles à marée basse). Sous ces conditions, la zone de formation régulière du pied de glace de haut estran couvre 60 % du haut estran.

Les modes de mise en place de la glace de haut estran sont liés au climat de vagues. On observe sous des conditions calmes, des accumulations de couches de glace dans la zone de battement de la marée ou alors le dépôt de glace formée en surface des eaux côtières. Il s'agit souvent de glace mince (encore transparente, signe de sa minceur) ou de glace un peu plus épaisse et morcelée en radeau (figure 81). Dans une moindre mesure, on peut observer des accumulations de frasil contribuant aussi à la formation du pied de glace de haut estran lorsque les conditions hydrodynamiques sont plus énergétiques (figure 82). En raison des conditions de vagues généralement calmes et du mode de formation du pied de glace caractéristique de ce site, l'intégration de sédiment dans le pied de glace de haut estran par les vagues est possible, mais plutôt rare (figure 85) d'après ce qui est observé à partir des caméras. Compte tenu de la faible occurrence de vagues chargées de sédiments venant frapper le front du pied de glace, peu de sédiments y sont intégrés. Lorsque la portion supérieure du haut estran est essentiellement libre de neige et de glace, le vent peut déplacer du sable vers la surface du pied de glace. D'après les observations préliminaires réalisées par caméras, le contenu en sédiment éolien dans le pied de glace est néanmoins lui aussi assez limité. L'acquisition de mesures sur le terrain (campagne de terrain et carottage du pied de glace par exemple) permettrait de vérifier les observations tirées de l'analyse des images de caméras.


Figure 81. Accumulation de couche de glace sur le haut estran par la marée et dépôt de radeau de glace de mer formée sur les eaux côtières, 5 février 2011, Penouille 1-3



Figure 82. Frasil dans les eaux côtières et s'accumulant sur le haut estran, 19 février 2011, Penouille 1-3



Figure 83. Rare évènement d'intégration de sédiment au pied de glace par les vagues, 13 mars 2013, Penouille 1-3

La portion supérieure du haut estran, quant à elle, est généralement occupée par un pied de glace nivale à moins qu'il n'y ait eu des évènements ayant mené à la submersion de cette zone et ayant généré un apport en glace significatif. Les vents dominants soufflent la neige vers le haut estran et y forment des congères. L'apport neigeux par le vent sur le haut estran est particulièrement visible devant la caméra 1 (figure 84). Lors du dégel, en général, le pied de glace nivale et la partie supérieure du pied de glace de haut estran fondent sur place. L'action thermique et mécanique des vagues sur le démantèlement est liée aux évènements météo-marins plus énergétiques qui sont moins fréquents, mais qui peuvent néanmoins se produire comme ce fut le cas le 2 avril 2013 (figure 85).



Figure 84. Congères sur le haut estran, 22 janvier 2011, Penouille 1-3



Figure 85. Déglacement de la portion supérieure du haut estran par les vagues le 2 avril 2013, phénomène peu fréquent sur le site de Penouille 1-3

Le bas estran est généralement étroit et, devant certains secteurs, presque inexistant (figure 81). Au cours des différentes saisons de suivi, il y a bel et bien eu de la glace sur le bas estran (figure 87). En 2013-2014, cette glace assure la protection de l'estran contre les agents hydrodynamique pendant plus de 100 jours. Par contre, la dynamique du pied de glace de bas estran est similaire à celle de la glace de mer couvrant en partie la baie de Gaspé. On remarque néanmoins que la glace comprise entre les barres sableuses et la côte est moins mobile et est maintenu plus longtemps en place lors de la débâcle. Notons enfin que lorsque le pied de glace de haut estran est mince et que les eaux côtières sont englacées, on observe occasionnellement la formation d'un corridor d'eau à marée haute entre la glace de haut estran et de bas estran où des radeaux de glace circulent (figure 86). Le phénomène a aussi été observé sur le site témoin de Pointe-Verte. La chronologie de la saison glacielle sur le haut estran et le bas estran (début et fin) et sa durée de même que le niveau de développement du pied de glace observé au cours des années de suivi sont présentés à la figure 87.

Les informations colligées par CSSA Consultants Ltée (1992) indiquent que le déglacement de la baie est influencé par le travail des brise-glaces pour le dégagement hâtif du principal chenal de l'estuaire de la rivière Darmouth et du havre de la baie de Gaspé. D'après ces informations, le travail des navires débute, selon les disponibilités de ces derniers, entre la mi-mars et la mi-avril. Sans le travail des brise-glaces, le départ des glaces serait retardé de plusieurs semaines. Actuellement, nous ne disposons pas d'informations sur l'activité des brise-glaces durant la période de suivi de 2000-2015. On ignore donc si de telles activités ont pu influencer la chronologie de la saison glacielle. Il faut aussi souligner ici que les relations empiriques ont été construites à partir des données de climat et des observations réalisées à partir des caméras et ne tiennent pas compte de la variabilité interannuelle ayant pu être directement causée par le travail de brise-glaces entre 2010 et 2015 (si les brise-glaces effectuent encore aujourd'hui de tels travaux).



Figure 86. Ouverture d'un corridor d'eau libre sur le haut estran où circule de la glace morcelée, 14 février 2011, Penouille 1-3



\*Moyenne des caméras 1 et 3

Figure 87. Saison glacielle, état d'englacement et niveau de protection verticale assurée par la glace de haut et de bas estran, Penouille 1-3

## 7.3.4. Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, Penouille 1-3

Sur le site de Penouille (7 stations de suivi), le long du segment d'analyse exposée au sud (Penouille 1-3), on obtient des R<sup>2</sup> élevés entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres météo-marins. En effet, les R<sup>2</sup> sont de l'ordre de 0,66 à 0,76 (figure 88). Contrairement à certaines relations qui sont fortement dirigées par des valeurs extrêmes (par exemple, Saint-Ulric ou La Martinique), le nuage de points est mieux réparti et ne compte pas de valeurs extrêmes qui s'écartent drastiquement des autres données.

Pour des déplacements négatifs moyens annuels compris entre environ 0 et 1,5 m, l'erreur quadratique moyenne entre les données observées et les données prédites par l'équation de la droite est de l'ordre d'une vingtaine de centimètres (figure 88).

En utilisant l'équation de la relation qui inclut le niveau d'eau, les vagues et l'englacement à la côte (Runup+WLEV effectif), il est possible d'évaluer la protection offerte par la glace entre 2006 et 2015 (tableau 21). Pour l'ensemble de cet intervalle, le nombre d'heures où le niveau d'eau total à la côte a été supérieur au seuil optimal (1,06) varie fortement d'une année à l'autre (71 à 264 heures) (tableau 21). Sur une base annuelle, le pied de glace aurait rendu ineffectifs entre 0 % et 45 % des heures pour lesquels le NETC a atteint ou dépassé le seuil optimal. En conséquence, l'absence de pied de glace au cours de la période 2006-2015 aurait permis une augmentation théorique des déplacements négatifs moyens annuels de 0 m à 0,65 m, soit une augmentation variant entre 0 % et 48 % par rapport à la valeur prédite par le modèle.



Figure 88. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Penouille 1 et 3

# Tableau 21. Évaluation de l'effet de protection offert par la glace durant la période 2006-2015 pour le site de Penouille 1-3

Année glacielle	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Nombre d'heures où le NETC a été supérieur au seuil optimal durant l'année	153	132	227	121	189	297	199	195	127	154
Nombre d'heures où le NETC a été supérieur au seuil optimal durant la saison glacielle	16	37	32	44	0	37	42	44	57	42
Nombre d'heure où le NETC effectif a été supérieur au seuil optimal	137	95	195	77	189	260	157	151	70	112
Ratio de protection (%)	10.46	28.03	14.10	36.36	0.00	12.46	21.11	22.56	44.88	27.27
Déplacement négatif moyen annuel observé (m)	0.825	0.075	1.05	0.4	0.825	1.35	1.36	1.09	0.37	0.61
Déplacement négatif moyen annuel prédit (modélisé) (m)	0.75	0.51	1.10	0.40	1.06	1.48	0.87	0.84	0.36	0.61
Différence entre « observé » et « modélisé » (m)	-0.07	0.43	0.05	0.00	0.24	0.13	-0.49	-0.26	-0.01	0.00
Recul prédit si l'on enlève l'effet de protection par la glace (m)	0.85	0.72	1.29	0.66	1.06	1.70	1.12	1.10	0.70	0.85
Augmentation conséquente (m)	0.09	0.22	0.19	0.26	0.00	0.22	0.25	0.26	0.34	0.25
Augmentation conséquence (%)	11.13	30.13	14.69	39.35	0.00	12.86	22.13	23.68	48.38	29.00

## 7.3.5. Estimation du changement de la vitesse de déplacement du couvert de glace pour l'horizon 2055, Penouille 1-3

En utilisant l'équation trouvée précédemment (figure 88), il est possible d'estimer l'effet de la diminution de l'englacement sur les déplacements négatifs moyens annuels pour l'horizon 2055.

Le nombre d'heures où le NETC a atteint ou dépassé le seuil optimal défini serait légèrement à la baisse (figure 89). Par contre, si on intègre l'effet de protection par la glace de haut et bas estran, le nombre d'heures où le NETC est supérieur au seuil optimal est légèrement à la hausse. Sous des conditions de vagues moins énergétiques, l'augmentation est donc seulement attribuable aux changements attendus pour l'état d'englacement de l'estran. Plus exactement, le nombre d'heures moyen annuel où la glace assure une protection contre les agents hydrodynamiques passe de 27 heures par année pour le passé récent à 8 heures par année pour l'horizon 2055. Il s'agit d'une diminution de 71 %. Néanmoins, d'après les modèles développés dans le cadre de ce projet et les simulations utilisées, ces changements impliqueraient seulement une augmentation de 7 % des valeurs de déplacements négatifs moyens annuels, passant d'une moyenne de 0,66 m à 0,70 m.

#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES





## 7.3.6. Dynamique d'évolution des terrasses de plage de Penouille 1-3 et influence de la glace d'estran

L'analyse historique à long terme réalisée à partir d'anciennes cartes montrent que la morphologie de la presqu'île est demeuré sensiblement la même depuis au moins l'an 1765 (Bernatchez et al., 2013). L'analyse historique plus récente réalisée, à partir des photographies aériennes, indique aussi qu'il s'agit d'un milieu stable. Pour l'intervalle 1948-2010, la vitesse moyenne de déplacement de la ligne de rivage a été de 0,19 m/an pour le segment de Penouille 1-3 (d'après les données produites par Bernatchez et al., 2013). Les modifications importantes qui ont été observées sont en partie attribuables au réajustement de la côte en réponse à des modifications anthropiques (par ex. ajout d'un quai puis retrait de ce quai) (Bernatchez et al., 2013).

Penouille s'avère tout de même sensible aux évènements de tempête. L'analyse des mesures de déplacement devant les bornes du LDGIZC (2005-2015) indiquent que le littoral a reculé avec une vitesse de déplacement de -0,82 m/an en moyenne dans les limites du segment d'analyse de Penouille 1-3. Les mesures réalisées aux stations suivis montrent que le littoral peut reculer localement de 4,7 m en une année (2011-2012). Lors de la tempête de du 6 décembre 2010 le recul de la ligne de rivage a été significatif (recul maximum de 2,7 m aux station de suivi) et que les profils de plage, surtout dans la partie supérieure, se sont abaissés sévèrement (Bernatchez et al., 2013). Toutefois, d'après les relevés réalisés sur 17 profils de plage entre juin 2010 et septembre 2011, les auteurs observent qu'au cours des mois suivants, les parties inférieures et médianes se sont rengraissées et ont trouvé, de nouveau, un profil d'équilibre. Ces auteurs soulèvent l'importance des barres sableuses et observent que celles-ci jouent un rôle de protection contre l'érosion lors des tempêtes grâce aux échanges sédimentaires qui s'opèrent entre les barres et la plage. Bernatchez et al. (2013) soutiennent aussi qu'il pourrait y avoir une remontée des sédiments de la zone prélittorale vers la zone intertidale qui assure un certain équilibre sédimentaire du système côtier.

Enfin, tel qu'indiqué à la section précédente, les simulations et modèles indiquent que les déplacements négatifs auraient été en moyenne de 0,66 m annuellement pour le passé récent (1981-2010) et seraient en moyenne de 0,70 m pour l'horizon 2055 (2041-2070) (figure 89 et figure 90). La vitesse moyenne des déplacements négatifs annuels modélisés pour l'horizon 2055 s'inscrit dans les vitesses moyennes négatives ayant été mesurées au cours des différents intervalles historiques.

#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES



Figure 90. Vitesse de déplacement de la ligne de rivage d'après les analyses historiques, moyennes des déplacements négatifs mesurées à partir des stations de suivi et simulées, Penouille 1-3

#### 7.3.7. Rôle de la glace et perspectives d'évolution

#### Mise en perspective des modèles

Le modèle obtenu pour Penouille qui a été retenu pour les calculs subséquents présente un R<sup>2</sup> de 0,66. Contrairement certains modèles obtenus ailleurs, le nuage de points est réparti autour de la droite et ne compte pas de valeurs extrêmes qui s'écartent drastiquement des autres données.

#### Rôle de la glace

La protection assurée par le développement de la glace de haut et de bas estran contre l'érosion à la côte par les agents hydrodynamiques a varié fortement durant l'intervalle 2005-2015 en fonction des conditions hydrodynamiques et glacielles (section 7.3.4). La glace avait alors permis de proteger la côte contre 0 à 45 % des évènements au potentiel érosif.

La diminution de l'englacement à Penouille prévue pour 2055 occasionnera une baisse de l'ordre de 54 % du nombre de jours où la glace assure une protection. Dans le cas de Penouille 1-3, malgré une diminution du nombre d'heures où le NETC est supérieur ou égal au seuil défini, la diminution de l'englacement de l'estran fait en sorte que l'on prévoit que le rôle de protection assuré par la glace subisse une baisse de l'ordre de 71 %.

#### Perspectives d'évolution côtière pour l'horizon 2055

Malgré une importante diminution de l'englacement, l'augmentation des valeurs de déplacements négatifs est limitée à 7 %. Toute chose étant égales par ailleurs, l'évolution historique et la dynamique côtière de Penouille 1-3 permettent d'affirmer que cette légère augmentation ne devrait pas se traduire par un recul accéléré de la côte dans le futur. Par contre, l'effet de la réduction de l'englacement de l'estran sur la dynamqiue des barres et sur les échanges sableux entre celles-ci et le haut estran demeure inconnu. Bernatchez et al. (2013) ont déjà démontré l'importance de ces échanges sur la résilience du système.

#### 7.4. Penouille 4-5

#### 7.4.1. Description du segment d'analyse de Penouille 4-5

Le site témoin de Penouille 4-5 appartiennent à la cellule hydrosédimentaire du même nom (figure 76 et figure 77). Localisée dans la baie de Gaspé, le littoral s'y étire sur 20,6 km et les dérives principales convergent vers la flèche de Penouille. Les données de marnage de la station marégraphique la plus proche sont celles de Gaspé (2320) et sont compilées à l'annexe K. Le marnage y est de l'ordre de 1,2 m (marée moyenne) à 1,7 m (grande marée).

Le second segment d'analyse de Penouille, soit Penouille 4-5, est d'une longueur de 760 m et est localisé sur l'extrémité ouest de la flèche : le littoral est orienté dans l'axe nord-sud et fait face à l'ouest, c'est-à-dire, au fond de la baie de Gaspé (figure 78). Devant ce segment, la dérive principale est divergente, c'est-à-dire qu'elle s'effectue vers le sud dans la moitié sud du segment et vers le nord dans la moitié nord. Le suivi est effectué à l'aide de deux caméras pour la période 2010-2014 (figure 91, figure 92).

Le segment côtier de ce site n'est pas orienté face aux vagues qui entrent dans la baie de Gaspé, et au contraire il est abrité, les vagues qui l'atteignent ne sont pas aussi puissante qu'ailleurs. Ce segment fait face au fond de la baie de Gaspé pour lequel le fetch est limité. Le visionnement des images acquises par les caméras Reconyx sur ce segment au cours de la tempête de décembre 2010 ne montrent pas de vagues particulièrement violentes. Pourtant, sur le segment de Penouille 1 et 3, les vagues sont puissantes et entraînent des reculs majeurs le long de la côte (annexe M).



Figure 91. Prise de vue à la caméra de Penouille 4



Figure 92. Prise de vue à la caméra Penouille 5

Sur ce segment, la flèche n'est pas artificialisée et le littoral est actif sur toute sa longueur (tableau 22). Comme pour le premier segment d'analyse, le haut estran est constitué de sable moyen et grossier. Ici, il est large de 13 m en moyenne (Bernatchez et al. 2013). Le bas estran est composé de sable moyen et grossier et comprend aussi une part de sable fin. Il n'y a pas de cordons sableux de bas estran devant ce segment d'analyse.

#### Tableau 22. Caractérisation du segment d'analyse de Penouille 4-5 (2010)

	Type de côte (%)	
État de la côte et artificialité	Flèche littorale	Total
Active ou vive ( - de 25% végé.)	100	100
Sans artificialité	100	100
Avec artificialité	0	0
Total	100	100

Source : LDGIZC, Trait de côte de l'est du Québec numérisé à l'écran et caractérisé par la Chaire de recherche en géoscience côtière d'après les photographies obliques héliportées de septembre 2010 et des validations terrain

# Tableau23. Caractéristiquesmorphologiquesduhautestrandusegmentd'analyse de Penouille4-5

	Altitude de la flexure (m)	Altitude de la ligne de rivage (m)	Largeur du haut estran (m)	Pente (%)	Volume (m <sup>3</sup> /m²)
Minimum	0,03	0,94	8,26	5,49	Nd
Maximum	0,11	1,00	16,82	10,36	Nd
Moyenne	0,06	0,98	11,96	8,17	Nd
Écart-type	0,04	0,03	3,78	2,31	Nd

Source : LDGIZC, Lidar 2008, profil de plage pour le projet Penouille, Parc Canada

### 7.4.2. Suivi par le MTQ, Penouille 4-5

Les cartes de dynamique hydrosédimentaire (n° 41 et n° 42), d'exposition à l'érosion (n° 41 et n° 42), d'exposition à la submersion (n° 41 et n° 42) de ce site témoin ont été fournies dans le cadre du projet X.008.1 (Drejza, 2014) (figure 76 et figure 77). Il n'a y aucune route suivie par le MTQ pour ce site témoin.

# 7.4.3. Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), Penouille 4-5

Grâce au suivi par caméras, on constate que le niveau d'eau à la côte atteint la ligne de rivage, ou presque, de manière assez fréquente. En conséquence, la zone de formation régulière du pied de glace de haut estran couvre 90 % du haut estran.

Les évènements de formation de glace sur le haut estran à Penouille 4-5 semblent assez variés. Surtout en début de saison, on observe parfois une bande de frasil dans l'eau le long de la côte et des accumulations en couches, en rides ou en petits cordons. Par la suite, de la nouvelle glace agglutinée en surface est formée sur les eaux côtières et glisse avec la marée haute sur le haut estran pour s'y accumuler. Aussi, lors des niveaux d'eau très bas, il y a de la glace qui se forme directement sur le bas estran et qui peut s'accumuler avec la marée montante sur le haut estran. Durant la période d'englacement, on observe aussi le bris de la glace accumulé et la formation de sarrasin (brash ice) qui est redéposé sur le haut estran. Contrairement à certains sites où on observe un mode de formation et d'accumulation franchement dominant, par exemple par accumulation de frasil à Rivière Saint-Jean, les observations réalisées pour Penouille 4-5 indiquent ici que les modes de formation et les types de glace accumulés sont diversifiés.

Le bas estran, quant à lui, n'est pas toujours découvert à marée basse. On peut le voir par contre lors de niveaux d'eau très bas (figure 93). Contrairement au site de Penouille 1-3, il n'y a pas de barres sableuses sur le bas estran. Néanmoins, comme sur le site de Penouille 1-3, le pied de glace de bas estran ne connaît pas une dynamique tout à fait distincte de celle de la banquise côtière. Enfin, il a été observé que le déglacement s'effectue de manière perpendiculaire à la côte plutôt que parallèlement (figure 94). La chronologie de la saison glacielle sur le haut estran et le bas estran (début et fin) et sa durée de même que le niveau de développement du pied de glace observé au cours des années de suivi sont présentés à la figure 95.



Figure 93. Marée basse découvrant le bas estran, 13 juillet 2010, Penouille 4-5



Figure 94. Déglacement de l'estran s'effectuant perpendiculairement à la côte, 24 mars 2010, Penouille 4-5



\*Moyenne des caméras 4 et 5

Figure 95. Saison glacielle, état d'englacement et niveau de protection verticale assurée par la glace de haut et de bas estran, Penouille 4-5

# 7.4.4. Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec les données de niveau d'eau, de vagues et de glace

Sur le site de Penouille 4-5, les relations entre les déplacements négatifs moyens annuels (6 bornes) et les paramètres météo-marins présentent toutes des R<sup>2</sup> de 0,72 (figure 96). Par contre, ces relations sont fortement dirigées par des valeurs extrêmes. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est inférieure à une dizaine de centimètres pour des valeurs de déplacements comprises entre 0 et 0,5 m environ. L'exclusion de la donnée de recul la plus forte (valeur extrême) ne permet pas d'obtenir des relations cohérentes (figure 97).



Figure 96. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Penouille 4 et 5



Figure 97. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Penouille 4 et 5, sans les valeurs les extrêmes

## 7.4.5. Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055

Compte tenu des relations faiblement concluantes ayant été trouvées, il serait hasardeux d'utiliser les équations des droites de régression linéaire pour estimer le déplacement de la côte pour l'horizon 2055.

# 7.4.6. Dynamique d'évolution du littoral et influence de la glace d'estran sur l'évolution côtière

Il a été indiqué à la section 7.3.6 que le littoral de Penouille est historiquement assez stable. Sur le segment d'analyse de Penouille 4-5, les vitesses moyennes de déplacement du littoral pour les différents intervalles sont comprises entre -1,16 m/an à 0,34 m/an (figure 98). Localement, des vitesses de recul allant jusqu'à -2,3 m/an ont été mesurées pour l'intervalle 2001-2004.

Le déplacement mesuré à l'aide des stations de suivi est de -0,14 m par an en moyenne entre 2005 et 2015. Le recul le plus important y ayant été mesuré a été de -0,95 m (2010-2011). Ce recul est largement en deçà du recul le plus important mesuré sur le site de Penouille 1-3 (4,7 m).

#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES



Figure 98. Vitesse de déplacement de la ligne de rivage d'après les analyses historiques, moyennes des déplacements négatifs mesurées à partir des stations de suivi et simulées, Penouille 4-5

#### 7.4.7. Rôle de la glace et perspectives d'évolution

#### Rôle de la glace

D'après les différents travaux recensés par Bernatchez et al. (2013), différentes hypothèses ont été émises jusqu'ici sur l'effet de la glace sur le littoral de Penouille et notamment sur le littoral orienté nord-sud (Penouille 4-5). Le C.R.E.M (1978, cité dans Veillette 1986<sup>4</sup>) aurait affirmé que « la poussée glacielle provoque un déplacement du sable de la plage et nivelle cette dernière » et que « en l'absence de structure de protection [au niveau de la ligne de rivage], cette poussé peut également engendrer de l'érosion au niveau du haut de plage en diminuant la pente et en créant une dénivellation au sommet ». En 1992, CSSA Consultants Ltée discutent eux aussi de l'effet de la glace sur le littoral de la presqu'île de Penouille en affirmant que « les empilements de glace sur la plage et sur le talus de la plage nord-sud peuvent contribuer à une faible érosion au printemps, mais [que] la quantité de sable arraché est mineure ». Veillette (1986) comme CSSA Consultants Ltée (1992) soulignaient pour leur part que l'érosion par la glace était moindre que les effets des vagues et des courants. Plus spécifiquement, CSSA Consultants Ltée (1992) affirmaient que « la formation, sa présence en hiver et le départ des glaces ne contribuent généralement pas de facon importante à l'érosion du haut de plage et du talus comparativement au rôle joué par les tempêtes automnales et l'utilisation humaine. Les glaces ont plutôt un effet protecteur en atténuant les vagues du golfe Saint-Laurent et en empêchant la formation de vagues locale. De plus, elles fixent le sable des plages et des talus qui se trouvent ainsi protégés de l'action érosive du vent et des vagues. » Pour CSSA Consultants Ltée, « l'action des glaces se limitait surtout à un remaniement sur glace du sable, sans addition ou retrait net [après quoi] les vagues redonnaient rapidement à la plage son profil d'équilibre ».

Les informations tirées du visionnement des images des caméras de suivi ne permettent pas de corroborer l'affirmation selon laquelle les poussées glacielles provoquent l'érosion de la terrasse de plage; les vents et les courants n'ont, en aucun cas, occasionné de poussées glacielles sur la plage entre 2010 et 2015. Le rôle de protection assuré par la glace est ce qui peut être soutenu grâce aux images des caméras. Néanmoins, il n'a pas été possible d'obtenir des modèles suffisamment solides pour pouvoir quantifier le rôle de protection durant la période de suivi. Les propos avancés en ce qui a

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Rapport non publié selon les références de Veillette (1986) : C.R.E.M, 1978, Étude d'impact d'utilisation au parc national de Forillon. Caractérisation du secteur de Penouille. Non publié. Ministère des Affaires indiennes et du Nord canadien, Parcs Canada, Québec; tome 1, Volume 1, 29-61 pp.

trait à l'effet de la glace sur le profil de plage mériteraient d'être évalués grâce à l'acquisition de données topographiques.

#### Perspectives d'évolution côtière pour l'horizon 2055

Bernatchez et al. (2013) soulèvent que la partie centrale du littoral nord-sud (Penouille 4-5) est une zone sensible au recul pour le futur (horizon 2050) en raison de sa faible disponibilité sédimentaire au niveau de la plage. Rappelons aussi que la dérive sédimentaire est divergente à partir du centre de ce segment côtier. Bernatchez et al. (2013) indiquent que le bâtiment de services, là où les caméras de suivi sont installées, devra être déménagé.

Encore une fois, la modification de la dynamique sédimentaire et de l'évolution des plages qui demeure inconnue et pourrait avoir des conséquences sur l'évolution du littoral. Avec la diminution de la durée de la saison glacielle, la durée d'action de la dérive sédimentaire augmente. Ceci pourrait accentuer le déficit sédimentaire caractérisant le centre de ce segment côtier.

#### 7.5. Chandler

#### 7.5.1. Description du segment d'analyse de Chandler

Le site témoin de Chandler appartient à l'unité hydrosédimentaire de Pabos (17,6 km) (figure 99). L'unité, qui ne comprend aucune cellule, est limitée à l'est par la marina de Grande Rivière et à l'ouest par le quai de Chandler. La dérive principale s'effectue vers le sud-est. Les données de marnage de la station marégraphique la plus proche sont celles de Grande Rivière (2279) et sont compilées à l'annexe K. Le marnage y est de l'ordre de 1,1 m (marée moyenne) à 1,8 m (grande marée).

Le segment d'analyse de Chandler (574 m) localisé à environ 2 km à l'est du port de Chandler a été suivi à l'aide d'une caméra durant la période 2011-2015 (figure 100, figure 101 et figure 102).



Tirée de Drejza et al., 2014, l'étoile indique la position de la caméra

Figure 99. Unité hydrosédimentaire de Pabos



Figure 100. Délimitation du segment d'analyse de Chandler



Figure 101. Prise de vue à la caméra de Chandler



Figure 102. Prise de vue oblique du littoral dans le secteur d'implantation de la caméra de Chandler, relevé photographique héliporté de septembre 2010

Le littoral du segment d'analyse est composé de falaises meubles à base rocheuse (13,78 %) ou de falaise rocheuse à sommet meuble (86,22 %). La côte est en majorité active (80,66 %). Une portion de côte est artificialisée (13,78 %) (tableau 24). Le littoral fait face au sud-sud-est. Le haut et le bas estran sont sableux avec du gravier et des blocs (LDGIZC, suivi bornes 2012). La largeur du haut estran du segment d'analyse varie entre 11,7 m et 23,1 m et est en moyenne de 17,3 m (tableau 25). Les volumes du haut estran n'ont pu être calculés pour ce site témoin puisqu'il n'avait pas été possible d'effectuer de mesure avec le système de laser mobile. Les données aéroportées de 2007 n'ont pas non plus permis d'effectuer le calcul des volumes (Drejza et al. 2014).

	Type de c		
État de la côte et artificialité	Basse falaise meuble à base rocheuse	Falaise rocheuse à sommet meuble	Total
Active ou vive ( - de 25% végé.)	0	80,66	80,66
Sans artificialité	0	80,66	80,66
Avec artificialité	0	0	0
Semi-végétalisée (entre 25 et 75% végé.)	13,78	5,56	19,34
Sans artificialité	0	5,56	5,56
Avec artificialité	13,78	0	13,78
Total	13,78	86,22	100

#### Tableau 24. Caractérisation du segment d'analyse de Chandler (2010)

Source : LDGIZC, Trait de côte de l'est du Québec numérisé à l'écran et caractérisé par la Chaire de recherche en géoscience côtière d'après les photographies obliques héliportées de septembre 2010 et des validations terrain

	Altitude de la flexure (m)	Altitude de la ligne de rivage (m)	Largeur du haut estran (m)	Pente (%)	Volume (m <sup>3</sup> /m²)*
Minimum	-0,42	1,64	11,73	10,25	0,40
Maximum	-0,24	2,29	23,14	11,76	1,52
Moyenne	-0,32	1,95	17,33	11,23	0,98
Écart-type	0,08	0,34	4,72	0,70	0,56

Tableau 25.	Caractéristiques	morphologiques	du	haut	estran	du	segment
d'analyse de	Chandler						

Source : LDGIZC, Lidar 2008

\* Seulement environ 100 m de calcul de volume sur 574 m

#### 7.5.2. Suivi par le MTQ, Chandler

Le site de suivi du MTQ BO903 S1 (naturel) fait partie du segment d'analyse. Il est adjacent du côté est au segment BO903 S2 (enroché). À proximité du segment d'analyse, le MTQ suit le tronçon BO902 S1 (naturel) et BO902 S2 (enroché). Les cartes de dynamique hydrosédimentaire (n° 49), d'exposition à l'érosion (n° 49), d'exposition à la submersion (n° 49) et d'exposition des sites suivis à l'érosion (n° 86) et à la submersion (n° 86) ont été fournies dans le cadre du projet X008.1 (Drejza et al., 2014).
## 7.5.3. Dynamiques glacielles selon les observations (caméras de suivi), Chandler

Les figures précédentes montrent que la largeur du haut estran est variable le long du site de Chandler et que le haut estran est parfois complètement absent (figure 101 et figure 102). Le visionnement des images de la caméra montre que la fréquence et l'intensité des contacts en la mer et la côte sont eux aussi variables. La dynamique glacielle varie en fonction des conditions morphologiques de la côte. En ce sens, la dynamique glacielle décrite ici porte sur la zone de plage visible directement devant la caméra et n'est possiblement pas la même qu'ailleurs le long de la côte.

Devant la caméra de Chandler, la zone de formation régulière du pied de glace de haut estran couvre 70 % du haut estran. Cette zone correspond à la portion du haut estran qui est régulièrement submergé par la marée combinée aux vagues. Ici, le pied de glace est construit grâce à l'apport de frasil et de petits glaçons par la marée et les vagues. Les apports en glace les plus importants se produisent souvent sous des conditions énergétiques. Le développement vertical de la glace (épaisseur) sur le haut estran s'est effectué rapidement durant les trois saisons observées. En effet, la croissance verticale de glace a été limitée à un seul évènement énergétique par saison, au cours duquel de la glace (frasil) s'est accumulée en cordon (2011-2012) ou en banquette (2013-2014 et 2013-2014) sur le haut estran. Autrement, il n'y a pratiquement pas eu de conditions permettant au pied de glace de croître verticalement. Aussi, en l'absence de pied de glace de bas estran, il a été observé que le front du pied de glace de haut estran était souvent derrière la flexure. Durant le suivi, les vagues n'ont possiblement pas été suffisamment énergétiques pour entraîner de l'affouillement à la base du front du pied de glace. Lors du déglacement, la dégradation du pied de glace s'effectue sous l'action mécanique et thermique dans la portion inférieure du haut estran. Dans la portion supérieure, la dégradation s'effectue exclusivement par fonte sur place (rayonnement solaire, température de l'air) lorsqu'aucune condition météo-marine énergétique ne permet aux vagues et à la marée de l'atteindre.

Du côté du bas estran, lequel est rarement découvert et très étroit, on observe que le développement d'une entité glacielle est limité. Lors du suivi de près de trois saisons (deux « chaudes » et une « froide »), le pied de glace de bas estran ne s'est pas développé du tout ou alors durant seulement quelques jours (figure 103). La glace de bas estran ayant pu être observée ne présentait pas un comportement distinct de la glace de mer. Au contraire, la glace de bas estran semblait plutôt correspondre simplement à des séquences d'accumulation de glace de mer le long de la côte. On remarque d'ailleurs que les concentrations observées passent constamment de 0 à 100 %. Ainsi, bien que la saison glacielle sur le bas estran ait duré 79 jours en 2013-2014, par exemple, durant les mois de janvier, février et mars, le pied de glace de bas a été « complet » durant seulement 4 jours. De plus, on compte un grand nombre de jours où la zone de bas estran était libre de glace durant la saison glacielle. La figure 103 présente les caractéristiques des saisons glacielles ayant pu être observées..



Figure 103. Saison glacielle, état d'englacement et niveau de protection verticale assurée par la glace de haut et de bas estran, Chandler

### 7.5.4. Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, Chandler

Étant donné que les processus qui occasionnent le recul des falaises sur le site de Chandler ne sont pas exclusivement d'origine hydrodynamique et que seulement deux bornes sont disponibles pour l'analyse de ce segment d'analyse, la mise en relation des déplacements négatifs (bornes) avec les données de glace et de vagues n'a pas été réalisée.

### 7.5.5. Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055

En l'absence de modèles, les valeurs de déplacements négatifs moyens pour le passé récent et pour l'horizon 2055 ne sont pas quantifiées.

# 7.5.6. Dynamique d'évolution des falaises et influence de la glace d'estran

Les falaises sur le site témoin de Chandler sont constituées en grande partie de roche sédimentaire, plus spécifiquement des grès (falaises rocheuses à sommet meuble ou falaises meubles à base rocheuse). Ce type de falaises subit de l'érosion notamment sous l'effet des processus de météorisation. Nous avons effectivement pu observer les effets de la météorisation sur les falaises durant le suivi (figure 104). Daigneault (2001) évalue la contribution des processus de météorisation au recul à généralement moins de 5 cm par processus par an (donc 5 cm par l'haloclastie, 5 cm par la cryoclastie, 5 cm par dessiccation-humidification, annuellement). L'analyse de l'évolution historique pour Chandler montre que la vitesse de recul moyenne est effectivement très faible avec -0,05 m/an (1934-2008).

Les matériaux libérés par la météorisation sont mobilisés sous l'effet de la gravité, du ruissellement (formant alors de petites coulées de sédiments/matériaux altérés) (figure 105) ou des vagues (figures 106 et 107). Sur la figure 104, on observe sur la surface du pied de glace nivale, l'accumulation de sédiments ayant été libérés par les processus de météorisation. Sur les figures 106 et 107, on constate que la surface de la falaise a été nettoyée des sédiments altérés sous l'effet des conditions énergétiques du 28 décembre (figure 106). Enfin, compte tenu de la pente

(non verticale) des falaises, l'altération de la surface des falaises par ces processus permet aussi ici à un peu de végétation de s'établir localement, de fixer les sédiments altérés, mais aussi d'altérer à son tour la surface (altération mécanique et chimique par les racines).



Figure 104. Détachement de matériaux météorisés visible sur le pied de glace nivale sur le site de Chandler (18 mars 2012 12h15 et 17h30)



Figure 105. Coulées de sédiments altérés déposées sur la surface du pied de glace, Chandler



Figure 106. Contact mer/falaise sous les conditions énergétiques du 28 décembre 2012, Chandler



Figure 107. État de la côte avant (haut) et après (bas) conditions énergétiques du 28 décembre 2012, la base est nettoyée de la surface altérée, Chandler

Autrement, ce type de falaises évolue de manière ponctuelle et localisée sous l'effet des processus gravitaires et hydrogéologiques (effondrements, glissements). Selon Daigneault (2001), l'ampleur de ce type d'évènements de recul est généralement de 0,50 m à 1 m, mais peut atteindre des dimensions beaucoup plus importantes. Nous n'avons pas observé de mouvements d'ampleur à l'aide des photos de suivi durant la période d'étude. Par contre, nous avons pu observer le décrochement de débord organique ; processus qui caractérise également l'évolution de ces falaises (figure 108). Pour une revue détaillée des caractéristiques des falaises de la baie des Chaleurs de même que des processus qui les affectent, il est pertinent de consulter la thèse de doctorat de Daigneault (2001).



Figure 108. Effondrement d'un morceau de débord organique sur le site de Chandler

Les grès sont reconnus comme une lithologie sensible à l'érosion par abrasion par les vagues. Cependant, nous sommes en mesure d'affirmer que l'évolution des falaises sur ce site n'est pratiquement pas attribuable à ce type de processus puisque, comme nous l'avons indiqué, le temps de contacts entre la mer et les falaises est limité puisque ces contacts ne se produisent que durant les conditions les plus énergétiques (vagues plus hautes et surcote) (figure 106). De plus, aucune encoche basale n'est visible dans ce secteur. Notons au passage que les épisodes de contact mer-falaise n'occasionnent pas de thermo-érosion puisque ce phénomène ne se produit pratiquement pas dans ce type de lithologie. Néanmoins, tel qu'indiqué plus haut, les vagues occupent un rôle dans l'évolution de la falaise mobilisant les sédiments altérés directement sur la falaise et en maintenant le profil de la falaise en dégageant les sédiments s'accumulant au pied de cette dernière. Ces observations ne s'appliquent pas aux segments côtiers où le haut estran est plus étroit ou alors inexistant et où les vagues frappent régulièrement la falaise; la dynamique côtière y étant différente de ce qui est observé directement devant la caméra.

Les observations réalisées à partir des caméras indiquent que le profil de plage subit une variation du volume (abaissement/rehaussement du profil) combiné à un changement granulométrique des sédiments visibles en surface (plus ou moins de graviers) au fil des évènements énergétiques et des périodes de beaux temps. L'abaissement du profil semble s'effectuer sous l'effet d'échanges transversaux s'effectuant sur une distance suffisamment courte pour que les sédiments restent accessibles/mobilisables lors des périodes de beau temps. En effet, au cours de la période de suivi, le profil a généralement été rehaussé dans les jours suivant les évènements énergétiques ayant occasionné un abaissement. De plus, on ne note aucun indice visuel (morphologique) indiguant un transport longitudinal important. Ces observations préliminaires sur la stabilité relative et la résilience du profil de plage mériteraient d'être validées à partir de suivis topographiques (caméras Axis ou suivi par DGPS) puisque le suivi par caméras telles que celles utilisées dans le cadre de ce projet ne permet pas de quantifier les changements topographiques. Ceci pourrait être analysé ultérieurement afin de développer une méthodologie adéquate pour contribuer à la compréhension les liens entre la morphodynamique et les conditions d'englacement pour le site de Chandler.



Figure 109. Modification du volume (abaissement-rehaussement) Abaissement du profil visible près du bloc suite à des conditions énergétiques (accumulations de sédiments plus grossiers (graviers), prise de vue du 3 octobre montre que le profil a retrouvé la condition initiale de la séquence.

#### 7.5.7. Rôle de la glace et perspectives d'évolution

#### Rôle de la glace

Le rôle de la glace contre l'érosion des falaises de Chandler n'a pas fait l'objet d'une quantification. Par contre, il a été observé que la présence de glace influence le moment où les sédiments libérés par les falaises sont mobilisés par les vagues (les sédiments altérés s'accumulent sur le pied de glace). Une présence plus ou moins longue de pied de glace de haut estran implique donc un décalage plus ou moins important entre le moment où les sédiments sont mobilisés et intégrés au transport sédimentaire.

Aussi, notons que Daigneault (2001) observe des encoches basales liées au mouvement des glaces sur de nombreux sites de la baie des Chaleurs. Par contre, aucune trace de ce processus d'érosion n'est visible directement sur le site témoin de Chandler (du moins directement devant la caméra).

#### Perspectives d'évolution côtière pour l'horizon 2055

Pour Chandler, on prévoit que la saison glacielle sur le haut estran passe de 84 jours à 35 jours (diminution de 58 %) (section 5.2.1). Il s'agit de la diminution la plus sévère prévue pour tous les sites à l'étude. Parallèlement, l'énergie des vagues sera aussi à la hausse, mais dans une moindre mesure (+ 30 % du nombre d'heures moyen annuel où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile) (section 6).

À la lumière de ces connaissances sur la dynamique d'évolution des falaises et des changements environnementaux prévus pour le site de Chandler, on peut présumer que la diminution de l'englacement de l'estran, malgré qu'elle soit importante, devrait avoir, somme toute, assez peu d'influences directes sur l'évolution de ces falaises puisque les agents hydrodynamiques ne sont pas les principaux agents de recul et que la hausse de l'énergie des vagues est modérée. Par contre, on ignore encore comment les modifications environnementales appréhendées (vagues et glaces) influenceront la dynamique sédimentaire. La modification des caractéristiques morphologiques de l'estran (profil, largeur) pourrait changer la fréquence et l'intensité des contacts entre la mer et la falaise et ainsi en modifier la dynamique.

#### 7.6. Maria

#### 7.6.1. Description du segment d'analyse de Maria

Le site témoin de Maria appartient à la cellule de Maria/Gesgapegiag (21,4 km) (figure 110). La dérive littorale est nettement vers le nord-est jusqu'à Gesgapegiag où elle devient plus diffuse. Les données de marnage de la station marégraphique la plus proche sont celles de Black Cape (2215) et sont compilées à l'annexe K. Le marnage varie entre 1,7 m (marée moyenne) et 2,5 m (grande marée).

Le segment d'analyse, d'une longueur de 4187 m, a été suivi à l'aide de deux caméras au cours de la période 2011-2015 (figure 111, figure 112, figure 113 et figure 114). La côte fait face au sud-est. Ce segment est à 6 km au sud-ouest du segment d'analyse de Pointe-Verte.



Tirée de Drejza et al., 2014, l'étoile indique la position de la caméra

Figure 110. Cellule hydrosédimentaire de Maria/Gesgapegiag



Figure 111. Délimitation du segment d'analyse de Maria et de Pointe-Verte



Figure 112. Prise de vue à la caméra Maria Est



Figure 113. Prise de vue à la caméra Maria Ouest



Figure 114. Prise de vue oblique du littoral dans le secteur d'implantation des caméras de Maria, relevé photographique héliporté de septembre 2010

Sur le segment d'analyse, la côte est entièrement composée de terrasses de plage (100 %) (tableau 26). La majorité est stable (55,60 %) ou en accumulation (21,81 %). Au total, le segment d'analyse est artificialisé à 80,31 %. Le mur qui protège la route 132 constitue l'essentiel de l'artificialité observée le long du segment d'analyse. On compte aussi 23,36 % de terrasses de plage artificialisées en accumulation, ce qui signifie qu'il y a eu une accumulation au pied du mur. Le haut estran, généralement sableux, varie en largeur entre 4,41 m et 36,10 m et est en moyenne de 17,25 m le long du segment d'analyse (tableau 27).

	Type de côte (%)	
État de la côte et artificialité	Terrasse de plage	Total
Active ou vive ( - de 25% végé.)	6,42	6,42
Sans artificialité	6,42	6,42
Avec artificialité	0	0
Semi-végétalisée (entre 25 et 75% végé.)	3,03	3,03
Sans artificialité	0,13	0,13
Avec artificialité	2,90	2,90
Végétalisée (+ de 75% végé.)	13,13	13,13
Sans artificialité	13,13	13,13
Avec artificialité	0	0
Accumulation (progradation)	21,81	21,81
Sans artificialité	0	0
Avec artificialité	21,81	21,81
Stable	55,60	55,60
Sans artificialité	0	0
Avec artificialité	55,60	55,60
Total	100	100

#### Tableau 26. Caractérisation du segment d'analyse de Maria (2010)

Source : LDGIZC, Trait de côte de l'est du Québec numérisé à l'écran et caractérisé par la Chaire de recherche en géoscience côtière d'après les photographies obliques héliportées de septembre 2010 et des validations terrain

Tableau 27. Caractéristiques morphologiques du haut estran du segment				
d'analyse de Maria				

	Altitude de la flexure (m)	Altitude de la ligne de rivage (m)	Largeur du haut estran (m)	Pente (%)	Volume (m³/m²)
Minimum	-0,25	0,90	4,41	6,57	0,29
Maximum	-0,02	2,68	36,10	16,35	2,12
Moyenne	-0,14	2,16	17,25	12,09	1,27
Écart-type	0,06	0,38	6,55	2,05	0,35

Source : LDGIZC, Lidar, 2011

#### 7.6.2. Suivi par le MTQ, Maria

Les cartes de dynamique hydrosédimentaire (n° 59 et n° 60), d'exposition à l'érosion (n° 59 et n° 60) et d'exposition à la submersion (n° 59 et n° 60) et d'exposition des sites suivis à l'érosion (n° 104) et à la submersion (n° 104) ont été fournies dans le cadre du projet X008.1 (Drejza et al., 2014). Le site de suivi du MTQ A1301 (segment A1301 S2, S3, S4 et S5) occupe la totalité du segment d'analyse. Le segment S6, au nord-est du segment S5, est extérieur au segment d'analyse de Maria.

## 7.6.3. Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi)

Le site témoin de Maria est situé dans la baie de Cascapédia dans la baie des Chaleurs ce qui en fait un milieu relativement abrité peu favorable à la formation de vagues très hautes. En effet, la baie des Chaleurs est relativement étroite et échancrée ce qui limite la propagation des fortes houles du golfe du Saint-Laurent. Sur les images des caméras de suivi, on observe effectivement que la hauteur des vagues est très limitée et que la nappe d'eau près de la côte est généralement peu agitée. À aucun moment durant la période de suivi, les vagues ne sont allées frapper la route devant la caméra Est. Le visionnement des images de la tempête du 30 décembre 2016 montre que les vagues n'ont pas non plus atteint la route (directement devant la caméra Est et Ouest).

La zone de formation régulière du pied de glace de haut estran a été estimée à 35 % à partir des images des caméras de suivi. Compte tenu des conditions hydrodynamiques calmes, cette zone n'est pas tellement plus large que la zone de battement de marée. Dans les environnements plus dynamiques, la zone de formation régulière du pied de glace de haut estran est plus large que la zone de battement de marée puisque le niveau d'eau à la côte est aussi influencé par les vagues, ce qui est à peine le cas ici.

Les conditions hydrodynamiques généralement calmes ne sont pas particulièrement favorables à l'accumulation de frasil (cristaux de glace en suspension dans l'eau) sur le haut estran comme on peut l'observer ailleurs. Ici, les conditions hydrodynamiques favorisent plutôt la formation de nouvelle glace en surface sur les eaux côtières. Celle-ci glisse sur le haut estran avec la marée montante et où elle est déposée. Au fil des marées, l'accumulation se fait de plus en plus importante jusqu'à former le pied de glace de haut estran. À mesure que la glace croît verticalement, l'eau monte de moins en moins loin sur la plage. L'épaisseur de la couverture de glace sur le littoral se situerait entre m et 1 m (Morneau et al., 2001). Sur la partie supérieure du haut estran, dans la zone de formation du pied de glace nivale, les chutes de neige s'accumulent en plus de la neige projetée par la machinerie pour le déneigement de la route 132 qui longe le littoral.

De manière générale, le bas estran n'est que peu, ou pas, découvert à marée basse (figure 115). Cependant, lors des marées les plus basses un bas estran relativement large est visible (figure 116). Les images des caméras de suivi montrent un pied de glace de bas estran très dépendant de la glace de mer. Bien qu'il constitue une entité glacielle distincte de la glace de mer ou de la banquise côtière, la distinction entre les entités glacielles est ici beaucoup moins importante, voire inexistante, que ce qui est observé ailleurs (par ex. bas estran sur la plate-forme rocheuse de Saint-Ulric). Ici, le pied de glace de bas estran, où la glace s'élève et s'abaisse avec la marée sans effectuer de déplacement latéral significatif, ne se développe que si les eaux côtières sont englacées et relativement statiques. La dynamique du pied de glace de bas estran est donc étroitement liée à celle de la glace de mer. Au fil des observations, la glace observée sur le bas estran était essentiellement de la glace de mer en circulation. Ce constat est valable tant pour les années froides que les années chaudes de la période de suivi.

Les eaux côtières visibles sur la caméra Est appartiennent à la baie de Cascapédia. Ces eaux n'ont pas été complètement englacées durant de longues périodes. Par exemple, durant la saison 2013-2014 («froide»), la glace couvre toute la section visible sans être morcelée et/ou évacuée seulement entre la mi-février et la fin février. La saison 2013-2014 a pourtant été une saison «froide» où la glace de mer a été abondante à l'échelle de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (observations du SCG). Bien que la baie de Cascapédia ne soit pas visible dans sa totalité à partir des caméras, ces observations contrastent avec celles de Morneau et al. (2001) qui affirment plutôt que « lors des hivers froids, la baie de Cascapédia est couverte de glace de la mi-janvier à la fin mars ».

Durant la saison 2011-2012 (saison « chaude »), la glace de mer circule toujours librement sans jamais former de banquise côtière immobilisée sur plusieurs jours ou semaine<sup>5</sup>. Néanmoins, on observe régulièrement la formation d'une mince couche de glace sur la baie de Cascapédia, mais celleci est souvent évacuée vers le large dans son intégralité en étant à peine morcelée. Compte tenu de la dynamique du pied de glace de bas estran, le

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> La banquise côtière est l'étendue de glace adjacente à la côte qui contrairement à la glace de mer qui circule, est immobile (20 jours minimum) et en interaction avec la côte et le fond (selon la définition de Mahoney et al., 2006). Elle est généralement attachée à la côte par le pied de glace.

nombre de jours où l'état d'englacement sur le bas estran est dit « complet » est très faible (figure 117). Morneau et al., (2001) affirment que « lors des hivers moins rigoureux, hormis les secteurs abrités, seule une bordure de glace se maintient le long des berges », ce qui est cohérent avec nos observations.

Au moment du déglacement, l'action mécanique des vagues sur le haut estran est limitée presque exclusivement aux conditions de vagues de tempête. C'est plutôt l'action thermique, lors des contacts entre la mer et le front du pied de glace, qui cause en partie la fusion du pied de glace ce qui est favorable à la formation de corniche. Les températures de l'air et le rayonnement solaire contribuent eux aussi à la fonte du pied de glace. Sous de telles conditions, le déglacement s'effectue de manière assez progressive. Notons aussi que lors du déglacement et de la débâcle, des glaçons et radeaux de glace de mer s'échouent momentanément sur le haut, mais surtout sur le bas estran.



Figure 115. Niveau d'eau observé généralement lors de la marée basse; le bas estran n'est pas découvert, 4 septembre 2012, caméra Est, Maria



Figure 116. Niveau d'eau observé occasionnellement lors de la marée basse : le bas estran est découvert, 17 octobre 2012, caméra Est, Maria



\*Moyenne des caméras est et ouest

Figure 117. Saison glacielle, état d'englacement et niveau de protection verticale assurée par la glace de haut et de bas estran, Maria

### 7.6.4. Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, Maria

Les mises en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi (2 stations) avec les données de niveau d'eau, de vagues et de glace ne sont pas concluantes pour le site de Maria (R<sup>2</sup> entre 0,01 et 0,66) (figure 118). Les déplacements négatifs moyens annuels de la côte ne sont pas bien expliqués par les paramètres hydrodynamiques intégrant ou non la protection offerte par la glace à la côte. Ici, le nombre de bornes pour obtenir le déplacement négatif moyen de la côte sur une base annuelle est probablement insuffisant avec seulement deux stations (MARI-01 et MARI-02 (moins de 150 m entre les stations et localisées près de la caméra). Il est aussi possible que les ondes de tempête produites en dehors de limites géographiques du modèle utilisé pour générer les niveaux d'eau puis les vagues aient une influence importante sur les résultats pour ce secteur (ondes occasionnant des surcotes).



Figure 118. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Maria

### 7.6.5. Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055, Maria

Comme les relations trouvées à la section précédente ne sont pas satisfaisantes, il n'est pas adéquat d'utiliser les équations de ces relations pour estimer le changement de la vitesse de déplacement du littoral pour l'horizon 2055. Actuellement, 80,31 % de la côte du segment d'analyse est artificialisée (trait de côte fixé par l'artificialité : pas de projection d'évolution).

#### 7.6.6. Dynamique d'évolution du littoral et influence de la glace d'estran sur l'évolution côtière

L'évolution historique montre que le littoral du segment d'analyse de Maria est assez stable. Entre 1934 et 2007, la vitesse moyenne de déplacement de la ligne de rivage a été de -0,03 m/an (d'après les données de Bernatchez et al., 2012, pour les transects compris à l'intérieur des limites du segment d'analyse) (figure 119). La vitesse moyenne de déplacement pour l'intervalle 2005-2015 obtenue à partir des deux stations de suivi est de -0,24 m/an. Le littoral de Maria n'est pas à l'abri des vagues de tempêtes du sud-est qui, avec un fetch de 65 km, peuvent atteindre 1,5 m de hauteur et 5 à 6 secondes de période (Long, 2006). Ponctuellement, les déplacements négatifs ayant été mesurés aux stations de suivi ont atteint un maximum de -2 m (2013-2014, MAR-01A). Aussi, lors de la tempête du 6 décembre 2010<sup>6</sup>, le recul maximum mesuré à la suite de cet évènement a été de 12,8 m (mesuré dans l'extrême est du segment d'analyse) (Quintin et al., 2013).

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Aucune valeur de déplacement n'est disponible pour ces stations pour l'année 2010-2011 (tempête du 6 décembre 2010-2011).

#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES



Figure 119. Vitesse de déplacement de la ligne de rivage d'après les analyses historiques, moyennes des déplacements négatifs mesurées à partir des stations de suivi et simulées, terrasses de plage, Maria

#### 7.6.7. Rôle de la glace et perspectives d'évolution

#### Rôle de la glace

Le rôle de protection contre l'érosion à la côte assuré par la glace n'a pas fait l'objet d'une quantification pour le site de Maria. Cependant, en raison de la morphologie du site d'étude, l'effet de protection direct contre l'érosion à la côte par les agents hydrodynamique pourrait être assez limité. Avec une zone de formation régulière du pied de glace couvrant seulement 35 % du haut estran et une pente abrupte, l'altitude de  $D_{min}$  s'élève bien au-delà de l'altitude que pourrait atteindre théoriquement le point le plus haut du pied de glace (figure 120). Des mesures de terrain devraient être effectuées pour infirmer ou confirmer cette hypothèse.



Figure 120. Limites du pied de glace de haut estran et position approximative du  $D_{min}$ , 27 janvier 2012, caméra Est, Maria

#### Perspectives d'évolution côtière pour l'horizon 2055

L'estimation du changement de la vitesse de déplacement pour l'horizon 2055 n'a pas été réalisée faute de modèles adéquat. Historiquement, les vitesses de déplacement de la ligne de rivage des terrasses de plage de Maria sont généralement faibles et les reculs s'effectuent essentiellement sous des conditions extrêmes. On prévoit pour Maria une augmentation du nombre d'heures où Hs est supérieur au 95<sup>e</sup> percentile de 61 % (hiver +83 heures et printemps +43 heures). Parralèlement, on s'attend à ce que la saison glacielle soit écourtée de 45 % pour le haut estran et de 57 % sur le bas estran. Ces conditions seront vraisemblablement plus favorables à l'augmentation du nombre d'evènements de tempête (potentiel érosif) affectant le littoral pour l'horizon 2055. Ainsi, les modifications environnementales attendues pourraient entraîner une augmentation des valeurs de reculs pouvant être mesurées annuellement. Néanmoins, les données acquises jusqu'ici ne permettent pas de savoir si les modifications environnementales attendues seront suffisamment importante pour modifier la tendance historique (stabilité à léger recul) et faire en sorte que la tendance future soit à l'érosion.

De plus, il a été affirmé par Long (2006) ainsi que par Morneau *et al.* (2001) que la source sédimentaire principale du secteur de Maria serait sous-marine. Les analyses des images couleurs à haute résolution spatiale de 2005 montrent effectivement la présence de rides et de dunes de sable dans la zone prélittorale et intertidale qui migrent vers la côte impliquant un apport de sédiments provenant du large (Bernatchez et al., 2011). L'acquisition de connaissances sur l'impact de la glace sur la dynamique sédimentaire est dans ce contexte essentiel pour comprendre l'effet de la diminution de l'englacement sur la dynamique et l'évolution future du littoral de Maria.

Finalement, des données supplémentaires devraient être acquises pour mieux comprendre les interactions entre les vagues, le pied de glace de haut estran, la topographie de la plage et l'évolution de la côte.

#### Infrastructures routières

D'après Drejza et al. (2014), la très grande majorité de la route dans les limites du segment d'analyse est en imminence face au risque d'érosion. Pour l'essentiel, il s'agit de tronçons où le littoral est artificialisé. Ailleurs, elle est non exposée. Ce sont dans les zones artificialisées que la route est à risque de submersion par franchissement. Autrement, on compte seulement un court tronçon où la route est à risque de submersion (épaisseur d'eau potentielle entre 0,00 m à 0,20 m).

En ce qui a trait au risque d'érosion, comme la côte est déjà en imminence et déjà artificialisée, aucune réévaluation du risque ne pourrait être effectuée pour ce segment d'analyse à la lumière des résultats obtenus dans le cadre du présent projet.

L'augmentation de l'énergie des vagues en direction de la côte combinée à la diminution de l'englacement pourrait augmenter la fréquence des évènements de submersion par franchissement devant les zones artificialisées. Sous les conditions hydrodynamiques et glacielles prévues pour l'horizon 2055, le nombre d'évènements énergétiques atteignant les infrastructures sera à la hausse.

#### 7.7. Pointe-Verte

#### 7.7.1. Description du segment d'analyse de Pointe-Verte

Le site témoin de Pointe-Verte appartient à la cellule de Maria/Gesgapegiag (21,4 km) soit à la même cellule que le site témoin de Maria (figure 110). La dérive principale s'effectue vers le nord-est. Le site témoin de Pointe-Verte est localisé dans une zone échancrée de la côte sur la rive nord de la baie des Chaleurs. Les données de marnage de la station marégraphique la plus proche sont celles de Black Cape (Pointe Howatson, 2215) et sont compilées à l'annexe K. Le marnage y est de l'ordre de 1,7 m (marée moyenne) et 2,5 m (grande marée).

Le segment d'analyse, d'une longueur de 1099 m, est localisé à proximité de la flèche (Pointe-Verte) près de l'embouchure de la rivière Verte (figure 111). Ce segment a été suivi à l'aide d'une caméra durant la période 2011-2015 (figure 121 et figure 122).



Figure 121. Prise de vue à la caméra de Pointe-Verte



Figure 122. Vue globale du segment d'analyse de Pointe-Verte, relevé photographique héliporté de septembre 2010

Le segment est composé de terrasses de plage artificialisées et stables (21,32 %) (tableau 28). Une portion du segment d'analyse est située sur la flèche littorale où l'on compte 29,34 % de côtes stables et artificialisées de même que 12,94 % de côtes végétalisées demeurant à l'état naturel. L'artificialité est en majorité constituée de murets construits le long des terrains bordant la plage. La côte fait face au sud-est. Le haut estran, composé de sable, gravier et galets, a une largeur moyenne de 14,04 m (tableau 29). Le long du segment, la largeur du haut estran varie peu avec un minimum de 12,25 m et un maximum de 17,37 m. Le volume des plages varie entre 0,85 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> et 1,12 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> et est d'en moyenne 1,00 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.

	Type de cé		
État de la côte et artificialité	Flèche littorale	Terrasse de plage	Total
Active ou vive ( - de 25% végé.)	6,17	0	6,17
Sans artificialité	6,17	0	6,17
Avec artificialité	0	0	0
Végétalisée (+ de 75% végé.)	12,94	0	12,94
Sans artificialité	12,94	0	12,94
Avec artificialité	0	0	0
Stable	29,34	21,32	50,66
Sans artificialité	0	0	0
Avec artificialité	29,34	21,32	50,66
Accumulation (progradation)	30,22	0	30,22
Sans artificialité	30,22	0	30,22
Avec artificialité	0	0	0
Total	78,68	21,32	100

#### Tableau 28. Caractérisation du segment d'analyse de Pointe-Verte (2010)

Source : LDGIZC, Trait de côte de l'est du Québec numérisé à l'écran et caractérisé par la Chaire de recherche en géoscience côtière d'après les photographies obliques héliportées de septembre 2010 et des validations terrain

### Tableau 29. Caractéristiques morphologiques du haut estran du segment d'analyse de Maria

	Altitude de la flexure (m)	Altitude de la ligne de rivage (m)	Largeur du haut estran (m)	Pente (%)	Volume (m³/m²)
Minimum	-0,61	1,23	12,25	11,73	0,85
Maximum	0,18	2,03	17,37	16,02	1,12
Moyenne	-0,34	1,63	14,04	13,98	1,00
Écart-type	0,24	0,21	1,40	1,14	0,09

Source : LDGIZC, Lidar 2011

#### 7.7.2. Suivi par le MTQ, Pointe-Verte

Les cartes de dynamique hydrosédimentaire (n° 60), d'exposition à l'érosion (n° 60) et d'exposition à la submersion (n° 60) ont été fournies dans le cadre du projet X008.1 (Drejza et al., 2015). Il n'y a aucun tronçon routier suivi par le MTQ à l'intérieur du segment d'analyse de Pointe-Verte.

## 7.7.3. Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), Pointe-Verte

Le site de Pointe-Verte est exposé essentiellement aux mêmes conditions hydrodynamiques que Maria : l'énergie des vagues à la côte est limitée et les eaux côtières ont été généralement calmes durant la période de suivi. À marée haute, l'eau atteint ici régulièrement les murets de bois, et ce, même sous des conditions hydrodynamiques très calmes (figure 123). La zone de formation régulière du pied de glace de haut estran couvre généralement, à moins d'évènements particuliers, toute la largeur du haut estran (100 %). De manière générale, il n'y a pas de pied de glace nivale sur l'estran de Pointe-Verte.



Figure 123. Marée haute en contact avec les murets et en l'absence de vagues, 13 décembre 2011, Pointe-Verte

De façon générale, la formation du pied de glace de haut estran s'effectue par accumulation de frasil en suspension (figure 124) et grâce à de la nouvelle glace et de la jeune glace formée sur les eaux côtières (figure 125) qui, avec la marée, glisse et s'échoue sur le haut estran. On observe aussi, occasionnellement, que des radeaux de glace peuvent venir engraisser le pied de glace. Lors de la saison 2014-2015, des conditions hydrodynamiques énergétiques survenues tardivement durant l'englacement ont permis de morceler la glace et de projeter des radeaux sur le haut estran.



Figure 124. Accumulation de frasil (rides) sur le haut estran, 3 janvier 2013, Pointe-Verte



Figure 125. Formation de nouvelle glace en surface par agglomération de frasil

Bien que le pied de glace de haut estran couvre généralement tout le haut estran, son développement vertical semble souvent insuffisant pour limiter le contact entre la mer et les murets lors des plus hauts niveaux d'eau. La mer submerge à de multiples reprises le pied de glace de haut estran (figure 126 et figure 127). L'englacement du littoral est aussi occasionnellement caractérisé par la formation, à marée haute, d'un étroit corridor d'eau libre entre le pied de glace de haut estran et le pied de glace de bas estran dans lequel circulent des radeaux de glace. En fonction des conditions, les radeaux se déplacent sur des distances plus ou moins longues. Cette configuration ponctuelle et ce mouvement de la glace ont aussi été observés à Penouille 1-3 (figure 128).

Lors du déglacement, le recul sur le front du pied de glace de haut estran s'effectue surtout thermiquement (contact eau, température de l'air et rayonnement) et dans une moindre mesure, mécaniquement lorsque les conditions de vagues sont un peu plus énergétiques. Le recul s'effectue principalement lors du contact avec la mer et sans que le pied de glace ne soit morcelé. Advenant des conditions de vagues plus énergétiques, le recul s'effectue alors plus rapidement. Compte tenu de la zone d'influence de la marée et des vagues sur le haut estran, il est très rare qu'une portion du pied de glace ne fonde entièrement sur place. Enfin, comme sur pratiquement tous les sites d'étude, des morceaux et radeaux de glace s'échouent sur le haut et le bas estran lors du déglacement (figure 129).



Figure 126. Submersion du pied de glace de haut estran et mince couche de glace de mer, 9 février 2013 (pas de vagues), Pointe-Verte



Figure 127. Submersion du pied de glace de haut estran, 19 janvier 2015 (première image) et 21 janvier 2015 (images suivantes), Pointe-Verte



Figure 128. Ouverture d'un corridor d'eau libre sur le haut estran où circule de la glace morcelée, 25 janvier 2012, Pointe-Verte


Figure 129. Morceaux et radeaux de glace échoués sur l'estran, 3 mars 2012, Pointe-Verte

Tout comme sur le site voisin (Maria), le bas estran de Pointe-Verte n'est pas systématiquement découvert à marée basse (figure 130). Lorsque la marée est suffisamment basse par contre, celle-ci découvre un bas estran plus large que ce qui est observé devant les caméras de Maria (figure 131). Même si ce dernier est plus large que sur le site de Maria, la glace qui s'y forme n'y est pas non plus caractérisée par une dynamique distincte de la dynamique de la banquise côtière. La figure 132 résume les observations de l'état d'englacement et du niveau de protection assuré par la glace devant la caméra de Pointe-Verte.



Figure 130. Niveau d'eau observé généralement lors de la marée basse ; le bas estran n'est pas découvert, caméra Est



Figure 131. Niveau d'eau observé occasionnellement lors de la marée basse : le bas estran est découvert, Pointe-Verte (voir les limites géomorphologiques à la figure 116)



\*Une seule caméra à Pointe-Verte

Figure 132. Saison glacielle, état d'englacement et niveau de protection verticale assurée par la glace de haut et de bas estran, Pointe-Verte

# 7.7.4. Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec les données de niveau d'eau de vagues et de glace, Pointe-Verte

En raison de l'artificialité de la côte le long du segment d'analyse de Pointe-Verte, on compte un nombre limité de station de suivi et seulement quelques mesures sporadiques. La relation entre ces données éparses et les conditions d'englacement et hydrodynamique n'est donc pas possible.

# 7.7.5. Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055, Pointe-Verte

En l'absence de modèles, les valeurs de déplacements négatifs moyens pour le passé récent et pour l'horizon 2055 ne sont pas quantifiées. De plus, l'artificialité de la côte le long du segment d'analyse de Pointe-Verte limite la réalisation de projection d'évolution côtière.

## 7.7.6. Dynamique d'évolution du littoral

Le littoral de Pointe-Verte a été en recul à l'échelle historique de 1934-2007 avec taux de déplacement moyen de -0,34 m/an (d'après les données réalisées de Drejza et al., 2014) (figure 133). Sauf pour deux intervalles, l'évolution moyenne était négative. Aujourd'hui, le littoral est généralement artificialisé et la ligne de rivage est donc essentiellement fixée dans sa position actuelle.

#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES



Figure 133. Vitesse de déplacement de la ligne de rivage d'après les analyses historiques, Pointe-Verte

## 7.7.7. Rôle de la glace et perspectives d'évolution

#### Rôle de la glace

Le rôle de protection de la glace contre l'érosion n'a pas été quantifié pour le site de Pointe-Verte. Les conclusions sont similaires à celles de Maria (section 7.6.7).

## Perspectives d'évolution côtière pour l'horizon 2055

À Pointe-Verte, la côte est généralement artificialisée à l'aide de murets construits par les propriétaires des terrains adjacents à la côte. Comme ces infrastructures fixent le trait de côte, aucun recul n'est anticipé pour ce site, et ce, même si les faiblesses de ces ouvrages sont connues et documentées (par exemple, érosion derrière les murets ou destruction des ouvrages avec érosion côtière lors de tempêtes majeures) (Quintin et al., 2013) (figure 134). L'augmentation du nombre d'heures où Hs est supérieur au 95<sup>e</sup> percentile (+61 %) et la diminution de la durée de la saison glacielle sur le haut (-38 %) et sur le bas estran (-52 %) pourrait faire en sorte que la fréquence et l'intensité des contacts entre la mer et les murets et, potentiellement, augmenter le nombre d'évènements d'érosion côtière et de bris des murets.



Figure 134. Exemple d'érosion derrière un muret, tempête du 6 décembre 2010, Pointe-Verte

Aussi, les flèches, telles que celle de Pointe-Verte, sont des formes d'accumulation construites grâce à la dérive littorale et ces environnements sont considérés comme étant parmi des plus dynamiques du domaine maritime. En ce sens, les changements des conditions glacielles et entraîneront des changements à la hydrodynamiques dynamique sédimentaire, lesquels sont susceptibles d'affecter ce type d'environnement. L'augmentation de l'énergie des vagues devrait permettre de mobiliser de plus grands volumes sédimentaires. La diminution de la durée de la saison glacielle, quant à elle, implique que le temps où les sédiments sont mobilisables, plutôt que fixés sous le pied de glace sera à la hausse. Enfin, sachant que les directions des vagues varient selon les saisons, une quantification intra-annuelle devrait être envisagée pour quantifier ces changements. Actuellement, aucune étude n'a permis de quantifier l'effet de la glace sur le transit sédimentaire longitudinal (dérive littorale) alors qu'il pourrait potentiellement s'agir d'un changement environnemental significatif dans la dynamique côtière.

## 7.8. La Martinique

## 7.8.1. Description du segment d'analyse de La Martinique

Le site témoin de La Martinique aux Îles-de-la-Madeleine appartient à la cellule hydrosédimentaire de la baie de Plaisance (17,7 km) (figure 135). Les courants de dérives principales convergent vers le centre de la cellule (Drejza et. al., 2014). Le marnage, mesuré au marégraphe de Cap-aux-Meules, est de 0,6 (marée moyenne) à 1,1 m (grandes marées). Les données détaillées des niveaux d'eau tels que mesurés à ce marégraphe sont disponibles à l'annexe K.

Le segment d'analyse de La Martinique, d'une longueur de 5787 m, a été suivi à l'aide de quatre caméras entre 2008 et 2015 (figure 136 à142). Le segment couvre la partie nord de la baie de Plaisance où la côte fait face à l'est. Ici, le courant de dérive principale se dirige vers le sud.



Tirée de Drejza et al., 2014, l'étoile indique la position des caméras

Figure 135. Cellule hydrosédimentaire de la baie de Plaisance



Figure 136. Délimitation du segment d'analyse de La Martinique



Figure 137. Prise de vue à la caméra La Martinique\_ENROCHEMENT



Figure 138. Prise de vue oblique du littoral dans le secteur d'implantation de la caméra La Martinique\_ENROCHEMENT, relevé photographique héliporté de septembre 2010



Figure 139. Prise de vue à la caméra La Martinique\_NORD



Figure 140. Prise de vue à la caméra La Martinique\_SUD



Figure 141. Prise de vue à la caméra La Martinique\_LARGE



Figure 142. Prise de vue oblique du littoral dans le secteur d'implantation des caméras de La Martinique, relevé photographique héliporté de septembre 2010

Le littoral du segment d'analyse est une côte à tombolo/cordon sans aucune artificialité et en majorité végétalisé (72,71 %) (tableau 30). Directement au nord des limites du segment d'analyse, le littoral est artificialisé (enrochement pour la protection de la route 199) et la largeur du haut estran rétrécit progressivement jusqu'à ce qu'il soit complètement absent (observations extérieures aux limites du segment d'analyse du présent projet). Le haut estran (Lidar, 2008) est sableux et varie en largeur entre 21,99 m et 16,84 m et est en moyenne de 44,45 m. Le volume varie entre un minimum de 0,31 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> et un maximum de 1,11 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> pour une valeur moyenne de 0,54 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> (tableau 31). En raison du faible marnage (0,6 m), le bas estran est très peu développé. Celui-ci, comme le haut estran, est sableux.

Tableau 30. Caractéristiques des côtes du segment d'analyse de La Martinique(2010)

	Type de côte (%)				
État de la côte et artificialité	Tombolo / cordon littoral	Total			
Active / Vive (- de 25 % végé.)	17,82	17,82			
Sans artificialité	17,82	17,82			
Semi-végétalisée (entre 25 et 75 % végé.)	9,47	9,47			
Sans artificialité	9,47	9,47			
Végétalisée (+ de 75 % végé.)	72,71	72,71			
Sans artificialité	72,71	72,71			
Total	100	100			

Source : LDGIZC, Trait de côte de l'est du Québec numérisé à l'écran et caractérisé par la Chaire de recherche en géoscience côtière d'après les photographies obliques héliportées de septembre 2010 et des validations terrain

	Altitude de la flexure (m)	Altitude de la ligne de rivage (m)	Largeur du haut estran (m)	Pente (%)	Volume (m3/m²)
Minimum	0,17	0,72	21,99	0,26	0,31
Maximum	0,69	3,38	16,84	8,97	1,11
Moyenne	0,35	1,40	44,45	2,84	0,54
Écart-type	0,11	0,67	22,29	2,20	0,14

Tableau 31.	Caractéristiques	morphologiques	du	haut	estran	du	segment
d'analyse de	La Martinique						

Source : Lidar, 2008

## 7.8.2. Suivi par le MTQ, La Martinique

À l'intérieur du segment d'analyse, le MTQ assure le suivi des sites F0103 S1 et S2. Il s'agit de l'enrochement assurant la protection de la route 199 dans la portion nord de la cellule hydrosédimentaire. Le Ministère suit aussi un site, le F0102 S4E, S5E, S20 et S30, au pont-jetée du Havre-aux-Basques à la limite sud du segment d'analyse. Les cartes de dynamique hydrosédimentaire (n° 65), d'exposition à l'érosion (n° 65A) et d'exposition à la submersion (n° 65) et d'exposition des sites suivis à l'érosion (n° 110 A et B et n° 111 A et B) et à la submersion (n° 29 et n° 30) ont été fournies dans le cadre du projet X008.1 (Drejza et al., 2014).

# 7.8.3. Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), La Martinique

Sur le haut estran du site d'étude de La Martinique, le pied de glace se forme principalement par accumulation de nouvelle glace (frasil) sous forme de rides, de couches, de cordons ou de banquette (75 % des évènements de formation observés entre 2008 et 2012) (Senneville et al., 2014). La zone de formation régulière du pied de glace de haut estran est évaluée à 40 %.

Comme sur le site de Pointe-aux-Loups, il n'y a pas de bas estran qui soit immergé ou émergé selon les cycles de marées. Il n'y a donc pas de pied de glace de bas estran. La banquise côtière est l'entité glacielle rencontrée directement après le pied de glace de haut estran. En raison des vents qui soufflent vers le large, le développement de la banquise côtière lors des années de suivi, même les années de suivi « froides », est peu important comparativement à ce qu'on observe sur le site de Pointe-aux-Loups. La glace de mer qui s'écoule dans le golfe du Saint-Laurent est poussée le long des côtes nord-est des Îles-de-la-Madeleine alors que, devant les côtes sud-ouest, les eaux peuvent être libres de glace. On peut observer ce patron d'écoulement de la glace de mer aux figures 143 et 144.

Au moment du déglacement, une fois la banquise côtière évacuée, les vagues peuvent de nouveau atteindre le haut estran où elles démantèlent en partie ou en totalité le pied de glace. Selon les conditions météo-marines qui prévalent lors du déglacement, une portion du pied de glace (dans la zone supérieure du haut estran) fondra sur place. Le bilan des observations est présenté à la figure 145.



Figure 143. Carte synoptique de la concentration de glace de mer dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent en date du 9 mars 2009



Figure 144. Carte synoptique du stage de développement de glace de mer dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent en date du 9 mars 2009



\*Moyenne des caméras NORD, SUD et LARGE

2008-2009 : En raison de la morphologie de la glace, l'état d'englacement a été complet pendant plusieurs jours (ex. 70 % et 3) alors que l'indice de protection établi visuellement était de 0,5 (protection verticale partielle).

Figure 145. Saison glacielle, état d'englacement et niveau de protection verticale assurée par la glace de haut et de bas estran, La Martinique

# 7.8.4. Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, La Martinique

Sur le site de La Martinique, on compte 11 stations de suivi pouvant être utilisées pour mettre en relation les mesures de déplacements négatifs avec les conditions hydrodynamiques et glacielles. Notons que pour le site de La Martinique, la période de suivi d'évolution côtière à l'aide des bornes est plus courte qu'ailleurs puisque l'on ne dispose ici que de 5 années de suivi (intervalle 2011-2015).

Sur le site de La Martinique, le R<sup>2</sup> des relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques et glaciels sont excellents ; tous compris entre 0,93 à 0,97 (figure 146). Par contre, on observe une fois de plus que les relations sont dirigées par les valeurs extrêmes et qu'il est difficile d'expliquer l'évolution négative de la côte pour les déplacements négatifs moyens annuels de moins de 0,5 m environ.

En excluant les valeurs extrêmes, les R<sup>2</sup> des relations cohérentes trouvées sont de 0,60 et 0,71 (figure 147). Évidemment, la relation négative du WLEV+runup est incohérente avec la physique puisque les seuls processus pouvant générer des reculs à la côte sont d'origine hydrodynamique. Aussi, on remarque que le seuil optimal trouvé pour la relation entre le niveau d'eau (WLEV) et les déplacements négatifs est très bas par rapport à tous les autres.

Malgré les limites décrites ici, il est possible d'utiliser les relations trouvées (relations incluant les valeurs extrêmes) (figure 146). Plus exactement, c'est la relation qui inclut le niveau d'eau, les vagues et l'englacement à la côte (Runup+WLEV effectif) qui est utilisée pour estimer l'effet de protection offert par la glace durant l'intervalle 2011-2015 (tableau 32). Pour l'ensemble de cet intervalle, le nombre d'heures où le niveau d'eau total à la côte a été supérieur au seuil optimal (1,68) varie fortement d'une année à l'autre (0 à 54 heures) (tableau 32). Durant les années de suivi 2010-2015, la grande majorité des évènements de contact théorique (NETC≥seuil optimal) se sont produits en l'absence de protection par la glace. Le ratio de protection par la glace est donc de 0 % pour la plupart des années. En conséquence, s'il n'y avait pas eu de glace durant ces 5 années, le déplacement négatif moyen annuel n'aurait, théoriquement, subi aucun changement.

Tableau 32.	Évaluation	de	l'effet	de	protection	offert	par	la	glace	durant	la
période 200	6-2015 pour	le s	ite de L	.a M	lartinique		-		-		

Variables	2011	2012	2013	2014	2015
Nombre d'heures où le NETC a été supérieur au seuil optimal durant l'année	54	14	1	4	0
Nombre d'heures où le NETC a été supérieur au seuil optimal durant la saison glacielle	0	0	1	0	0
Nombre d'heure où le NETC effectif a été supérieur au seuil optimal	54	14	0	4	0
Ratio de protection (%)	0	0	100	0	na
Déplacement négatif moyen annuel observé (m)	1,62	0,54	0,13	0,52	0,28
Déplacement négatif moyen annuel prédit (modélisé) (m)	1,61	0,61	0,26	0,36	0,26
Différence entre « observé » et « modélisé » (m)	0,00	0,06	0,12	-0,16	-0,02
Recul prédit si l'on enlève l'effet de protection par la glace (m)	1,61	0,61	0,28	0,36	0,26
Augmentation conséquente (m)	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
Augmentation conséquence (%)	0	0	8,93	0	0



Figure 146. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de La Martinique



Figure 147. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de La Martinique, sans les valeurs les extrêmes

# 7.8.5. Estimation du changement de la vitesse déplacement du littoral en raison de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055, La Martinique

Malgré les limites précédemment énoncées, il est possible d'utiliser les relations trouvées, celles incluant les valeurs extrêmes (figure 146), pour estimer l'effet de la diminution de l'englacement sur l'évolution négative de la côte pour l'horizon 2055.

Selon les résultats obtenus, nous avons vu que le nombre d'heures où la hauteur des vagues est supérieure à 3,52 m (95<sup>e</sup> percentile du passé récent) au large de La Martinique sera à la baisse (figure 148). Malgré ce constat, le nombre d'heures où le NETC sera supérieur au seuil optimal défini (1,68) par la relation linéaire sera à la hausse. La hausse attendue est de l'ordre de 550 %. Sous l'effet de la diminution de l'englacement, le nombre d'heures où le NETC est effectif subit, lui, une hausse de 1871 %. Ceci signifie que le ratio de protection offert par la glace diminuera de 67 %. Dans de telles conditions, les valeurs de déplacements négatifs moyens annuels devraient passer, selon les modèles utilisés ici, de 0,26 m à 0,38 m. Ceci correspond à une augmentation de 43 %.



Figure 148. Évolution du NETC et de l'érosion entre le passé récent et l'horizon 2055, La Martinique

## 7.8.6. Dynamique d'évolution du littoral de La Martinique

L'analyse historique de l'évolution côtière du secteur de La Martinique montre qu'il est en accrétion (figure 149) (Bernatchez et al., 2010). Les vitesses moyennes de déplacement de la ligne de rivage mesurées dans les limites du segment d'analyse varient entre 0,72 m/an et 2,09 m/an (figure 149). Cette progression ne s'effectue pas sans que la côte ne recule occasionnellement. On observe des reculs à l'échelle de l'analyse historique que les vitesses de recul peuvent atteindre, localement, jusqu'à -3,06 m/an (1977-1983). Les vitesses maximums d'avancée ont atteint jusqu'à 6 m/an (1963-1977).

La moyenne annuelle des déplacements mesurés aux stations de suivi entre 2010 et 2015 a été de -0,55 m (incluant les forts reculs associés aux tempêtes de l'année 2010-2011). Les valeurs de recul mesuré annuellement (autre que nul) sont comprises entre de -0,2 m à -3,35 m.

Enfin, tel qu'indiqué à la section précédente, les simulations et modèles indiquent que les déplacements négatifs auraient été en moyenne de 0,26 m annuellement pour le passé récent (1981-2010) et seraient en moyenne de 0,36 m pour l'horizon 2055 (2041-2070) (figure 148 et figure 149). La vitesse moyenne des déplacements négatifs annuels modélisés pour l'horizon 2055 s'inscrit dans les vitesses minimums négatives ayant été mesurées au cours des différents intervalles historiques.

#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES



\* Réalisé à partir des données de Bernatchez et al., 2010

Figure 149. Vitesse de déplacement de la ligne de rivage d'après les analyses historiques, moyennes des déplacements négatifs mesurées à partir des stations de suivi et simulées, La Martinique

## 7.8.7. Rôle de la glace et perspectives d'évolution

#### Mise en perspective des modèles

Bien que les modèles développés ici soient dirigés par les valeurs extrêmes et qu'il est difficile d'expliquer l'évolution négative de la côte pour les déplacements négatifs moyens annuels de moins de 0,50 m environ (section 7.8.4), il a été possible de modéliser l'influence des évènements érosifs majeurs sur l'évolution de la côte. Comme la dynamique côtière du site de La Martinique est en partie liée aux évènements majeurs, les modèles ont pu être utilisés pour simuler les vitesses moyennes des déplacements pour le passé récent et pour l'horizon 2055.

## Rôle de la glace

La glace assure une protection contre les évènements hydrodynamiques énergétiques. Selon les résultats présentés ici, la protection offerte par la glace varie fortement d'une année à l'autre (section 7.8.5). Sous l'effet d'une augmentation de la fréquence où Hs est supérieur au 95<sup>e</sup> percentile et de la diminution de la saison glacielle (section 7.8.5 et section 5.2), on prévoit que le nombre d'heures où la glace assure une protection contre l'érosion sera à la baisse (-67 %).

La quantification de l'effet des modifications des conditions glacielles et hydrodynamiques sur l'ensemble de la dynamique sédimentaire du secteur n'a pas fait l'objet d'étude.

## Perspectives d'évolution côtière pour l'horizon 2055

L'augmentation de 43 % de la valeur des déplacements négatifs moyens annuel ne devrait pas entraîner un changement de tendance pour le site de La Martinique (accrétion). L'analyse historique montre que la portion nord de la baie prograde à des rythmes plus élevés dans le sud de la baie de Plaisance (km 9 à 12) qu'au nord de celle-ci (km 6 à 9). L'augmentation des valeurs des déplacements négatifs de la côte pourrait accentuer la différence observée entre le nord et le sud de la Baie et possiblement accentuer le problème d'érosion qui affecte actuellement la portion la plus au nord (zone enrochée et côtes adjacentes).

#### Infrastructures routières

Les résultats de Drejza et al. (2014) indiquent que la route est en imminence face au risque d'érosion dans la section déjà artificialisée et que le segment côtier directement adjacent à l'artificialité est exposé pour 2040. Dans un contexte où la côte est en progradation, on ignore si l'augmentation de l'érosion pourrait entraîner une accélération suffisamment importante pour que l'exposition de la côte soit plus hâtive ou si les vitesses de rétablissement de la côte seront suffisamment rapides pour limiter l'augmentation des reculs moyens annuels.

Pour la zone artificialisée tout juste au nord du segment d'analyse de La Martinique, on ne prévoit pas de changement de position du trait de côte. Par contre, la durée d'exposition de l'infrastructure aux agents hydrodynamiques devrait être à la hausse. Néanmoins, sur la base de l'analyse sommaire des conditions de vagues au large, on ne prévoit pas une augmentation de l'intensité des évènements de fortes vagues (Hs  $\geq$ 95<sup>e</sup> percentile de 1981-2010) (section 6).

Les résultats de Drejza et al. (2014) indiquaient que la route n'était pas exposée au risque de submersion. La simulation des conditions de vagues au large de La Martinique pour l'horizon 2055 indique que le nombre d'heures où la hauteur des vagues est supérieure au 95<sup>e</sup> percentile sera à la baisse. À la lumière de l'analyse sommaire des conditions de vagues, il est peu probable que l'exposition au risque de submersion change pour l'horizon 2055.

Encore une fois, l'effet des changements environnementaux sur la dynamique sédimentaire n'est pas connu et les conclusions tirées ici ne permettent pas d'en tenir compte. On ignore si la diminution de l'englacement pourrait occasionner des changements au profil du haut estran qui à leur tour aurait pour effet de favoriser l'érosion à la côte.

## 7.9. Pointe-aux-Loups

## 7.9.1. Description du segment d'analyse de Pointe-aux-Loups

Le site témoin de Pointe-aux-Loups aux Îles-de-la-Madeleine appartient à la cellule hydrosédimentaire du même nom (19,2 km) (figure 150). La dérive principale s'effectue vers le nord-est. Les données de la station marégraphique la plus proche sont celles de Grande-Entrée (1985) et sont compilées à l'annexe K. Ici, le marnage est de 0,6 m (marée moyenne) à 1,0 m (grande marée), ce qui correspond à un environnement micro-tidal.

Le segment d'analyse de Pointe-aux-Loups, d'une longueur de 17 385 m, est suivi à l'aide de trois caméras durant la période 2008-2015 (figure 151, figure 152, figure 153, figure 154 et figure 155). Les caméras sont localisées à un peu plus de 6,5 km de la limite sud-ouest de la cellule hydrosédimentaire. Le segment d'analyse couvre presque toute la cellule. La côte fait face au nord-ouest.



Tirée de Drejza et al., 2014, l'étoile indique la position des caméras

Figure 150. Cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups



Figure 151. Délimitation du segment d'analyse de Pointe-aux-Loups



Figure 152. Prise de vue à la caméra Pointe-aux-Loups\_NORD



Figure 153. Prise de vue à la caméra Pointe-aux-Loups\_SUD



PCBOO HYPERFIRE PRO

Figure 154. Prise de vue à la caméra Pointe-aux-Loups\_LARGE



Figure 155. Prise de vue oblique du littoral dans le secteur d'implantation des caméras de Pointe-aux-Loups, relevé photographique héliporté de septembre 2010

Le segment d'analyse est une côte à tombolo/cordon littoral à 100 % répartie entre des portions actives (61,77 %), semi-végétalisées (9,98 %), végétalisées (20,41 %) et stables (7,7 %) (tableau 33). Le haut estran est sableux et, directement devant la caméra qui pointe vers le large, on trouve un amas de blocs provenant de l'enrochement. La largeur moyenne du haut estran est de 33,31 m et varie entre 5,43 m et 58,14 m (tableau 34). Le volume du haut estran est en moyenne de 1,14 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Étant donné que le marnage est faible aux Îles-de-la-Madeleine, le bas estran est pratiquement inexistant. On retrouve dans la zone prélittorale des barres sableuses.

	Type de côte (%)				
État de la côte et artificialité	tombolo / cordon littoral	Total général			
Active ou vive ( - de 25% végé.)	61,77	61,77			
Sans artificialité	60,92	60,92			
Avec artificialité	0,86	0,86			
Semi-végétalisée (entre 25 et 75% végé.)	9,98	9,98			
Sans artificialité	0	0			
Avec artificialité	9,98	9,98			
Végétalisée (+ de 75% végé.)	20,41	20,41			
Sans artificialité	20,41	20,41			
Avec artificialité	0	0			
Stable	7,84	7,84			
Sans artificialité	0	0			
Avec artificialité	7,84	7,84			
Total	100	100			

Tableau 33. Caractérisation des côtes du segment d'analyse de Pointe-aux-Loups (2010)

Source : LDGIZC, Trait de côte de l'est du Québec numérisé à l'écran et caractérisé par la Chaire de recherche en géoscience côtière d'après les photographies obliques héliportées de septembre 2010 et des validations terrain

	Altitude de la flexure (m)	Altitude de la ligne de rivage (m)	Largeur du haut estran (m)	Pente (%)	Volume (m³/m²)
Minimum	-0,06	0,75	5,43	2,85	0,23
Maximum	0,47	7,84	58,14	20,22	4,55
Moyenne	0,17	2,91	33,31	8,74	1,14
Écart-type	0,12	1,11	9,93	3,72	0,43

Tableau 34.	Caractéristiques	morphologiques	du	haut	estran	du	segment
d'analyse de	Pointe-aux-Loups	5					

Source : LDGIZC, Lidar 2012

## 7.9.2. Suivi par le MTQ, Pointe-aux-Loups

Le MTQ suit les sites F0110 (segment S1, S2, S3, S4 et S5) et F0108 (S1) du côté du golfe du Saint-Laurent en plus des autres segments exposés du côté des lagunes F0107, F0109, F0115. Dans le cadre de ce projet, les segments exposés au golfe seulement seront considérés. Les cartes de dynamique hydrosédimentaire (n° 66), d'exposition à l'érosion (n° 66A) et d'exposition à la submersion (n° 66) et d'exposition des sites suivis à l'érosion (n° 116, 117 et 118 A et B) et à la submersion (n° 116 à n° 118) ont été fournies dans le cadre du projet X008.1 (Drejza et al., 2014).

Les images acquises à l'aide des caméras Reconyx montrent que des recharges sont effectuées ponctuellement sur ce site (figure 156).

Tableau 35. Date du premier jour où des travaux de recharges ont pu être captés
à partir des images des caméras pour le site de Pointe-aux-Loups (travaux
pouvant s'éténdre sur quelques jours)

Premier jour de travaux de recharge (aaaa-mm-jj)
2009-01-20
2009-09-29
2010-11-01
2011-02-03
2011-12-15
2012-10-09
2012-11-16
2013-06-10
2013-11-07
2012-10-02



Figure 156. Travaux de recharge en cours, 2 novembre 2010, Pointe-aux-Loups
# 7.9.3. Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), Pointe-aux-Loups

Sur le haut estran, le pied de glace se forme par accumulation de frasil. Plus exactement, d'après les observations de la période 2008-2012 (Senneville et al., 2014), le pied de glace s'y forme par une succession d'évènements d'accumulation de frasil en couches et en rides (64 % des observations) ou en cordons ou banquettes (18 % des observations). Le volume de glace accumulé est généralement plus important lorsqu'il s'agit d'accumulation en cordons ou en banquettes. Ici, la côte fait face aux vents dominants qui soufflent vers la côte et à la glace de mer qui s'écoule depuis l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. En raison de ces particularités liées à la position de ce site d'étude, le pied de glace de haut estran est parfois alimenté par des glaçons et radeaux de glace de mer à la dérive. Ce type d'accumulation correspondait à 18 % des observations d'évènements de formation analysés pour ce site entre 2008 et 2012. Ailleurs, par exemple sur la Côte-Nord, l'apport de glace de mer (morceaux, blocs, radeau) à la formation du pied de glace de haut estran est extrêmement limité, voire inexistant ; la glace de mer y étant généralement poussée vers le large.

À Pointe-aux-Loups, la zone de formation régulière du pied de glace de haut estran évaluée à 70 %. Dans les environnements micro-tidaux, tels que ceux des Îles-de-la-Madeleine, la largeur de la formation du pied de glace ne bénéficie que très peu de l'effet du battement des marées sur le haut estran. Ce sont plutôt les conditions atmosphériques et hydrodynamiques qui influencent le niveau d'eau et les vagues à la côte et donc, qui déterminent la zone où se produisent les accumulations de glace (nouvelle glace comme le frasil ou glace de mer).

Aussi, en raison du faible marnage, il n'y a pas de bas estran qui soit immergé ou émergé selon les cycles de marées sur le site de Pointe-aux-Loups. Il n'y a donc pas de pied de glace de bas estran tel que défini dans le cadre de ce projet. La banquise côtière est l'entité glacielle observée directement au front du pied de glace de haut estran. Cette banquise côtière est généralement assez stable grâce aux vents dominants qui poussent la glace de mer contre la côte. Ceci favorise la stabilité du pied de glace de haut estran en plus d'assurer elle-même un rôle de protection de la côte. Lors du déglacement, la banquise est morcelée puis évacuée. Par la suite, les vagues peuvent de nouveau atteindre le haut estran où elles démantèlent en partie ou en totalité le pied de glace. Selon les conditions météo-marines qui prévalent lors du déglacement, une portion du pied de glace (dans la zone supérieure du haut estran) fond sur place. La figure 157 présente les caractéristiques des saisons glacielles ayant pu être observées (celles pour lesquelles le suivi couvre la totalité de la saison).



Figure 157. Saison glacielle, état d'englacement et niveau de protection verticale assurée par la glace de haut et de bas estran, Pointe-aux-Loups

## 7.9.4. Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, Pointe-aux-Loups

Sur le site de Pointe-aux-Loups (75 stations de suivi), le niveau d'eau seul (WLEV) permet déjà d'expliquer en partie l'évolution négative de la côte avec des R<sup>2</sup> de 0,67 (excluant l'effet de protection par la glace) et de 0,73 (incluant l'effet de protection par la glace) et de 0,76 et 0,68 lorsque l'on considère les vagues (sans et avec la glace respectivement). Pour toutes les relations trouvées, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est d'environ 0,25 m. Malgré ces résultats à première vue satisfaisants, on constante que les relations trouvées sont fortement dirigées par des valeurs extrêmes et la majorité des déplacements négatifs moyens annuels d'un peu moins de 1 m à près de 2 m ne sont pas expliqués. En excluant les valeurs extrêmes, les résultats demeurent peu concluants (figure 159).



Figure 158. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Pointeaux-Loups



Figure 159. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Pointeaux-Loups, sans les valeurs les extrêmes

# 7.9.5. Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055, Pointe-aux-Loups

Compte tenu des relations faiblement concluantes ayant été trouvées, il serait hasardeux d'utiliser les équations des droites de régression linéaire pour estimer le déplacement de la côte pour l'horizon 2055.

#### 7.9.6. Dynamique d'évolution du littoral de Pointe-aux-Loups

De manière générale, le site d'étude est un système transgressif puisque l'ensemble du tombolo de Pointe-aux-Loups tend à migrer vers l'intérieur des terres (c.-à-d. vers la lagune du Havre aux Maisons), et ce, depuis au moins les deux derniers millénaires (Bernatchez et al., 2012b). Pour tous les intervalles compris entre 1963 et 2008, les vitesses moyennes de déplacements de la côte à tombolo pour le segment d'analyse de Pointe-aux-Loups ont été négatives (de -0,32 m/an à -1,12 m/an, pour une moyenne historique de -0,63 m/an) (figure 160). Les vitesses de recul les plus rapides atteintes localement ont été de l'ordre de -2,43 m/an (1963-1977) à -5,25 m/an (1977-1983). Inversement, les vitesses d'avancée les plus rapides ont été comprises entre 1,56 m/an (1992-2001) et 4,85 m/an (1977-1983). Bernatchez et al. (2010) indiquent que les reculs les plus rapides ayant été observés localement sont suivis d'avancées, elles aussi très rapides. Cette dynamique est attribuable aux brèches formées lors d'évènements de tempête (recul rapide) à la suite desquelles la reconstruction des dunes permet une accrétion et l'avancée de la ligne de rivage (avancées rapides). L'analyse historique de l'évolution côtière indique que le système connaît un déficit sédimentaire global (Bernatchez et al., 2010) et que les tempêtes constituent un des processus clés dans l'évolution de ces côtes (Bernatchez et al., 2008). Les tempêtes du nord-ouest sont très nombreuses et frappent directement la côte dans ce secteur (Bernatchez et al., 2008). À l'aide du réseau de stations de suivi, la valeur de reculs moyens annuels a été de -1,30 m/an.

#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES



Figure 160. Vitesse de déplacement de la ligne de rivage d'après les analyses historiques, moyennes des déplacements négatifs mesurées à partir des stations de suivi et simulées, Pointe-aux-Loups

#### 7.9.7. Rôle de la glace et perspectives d'évolution

#### Mise en perspective des modèles

Les modèles développés ici étaient fortement dirigés par les valeurs extrêmes (section 7.9.4) et n'étaient pas suffisamment concluants pour être utilisé pour modéliser l'évolution des valeurs de reculs moyens annuels pour l'horizon 2055.

#### Rôle de la glace

En raison de l'absence de modèles satisfaisants, le rôle de protection offert par la glace n'a pas pu faire l'objet d'une quantification.

#### Perspectives d'évolution côtière pour l'horizon 2055

On prévoit que l'énergie des vagues au large de Pointe-aux-Loups soit légèrement à la hausse (+21 % du nombre d'heures où Hs est ≥ au 95<sup>e</sup> percentile) (section 6). Aussi, sur les moyennes de 30 ans (passé récent et horizon 2055), il n'est pas prévu que la hauteur maximum des vagues atteinte annuellement soit à la hausse (section 6.2). Par contre, la diminution de la saison glacielle attendue pour ce site est drastigue ; passant de 117 jours à 56 jours (perte de 61 jours, diminution de 52 %) (section 7.9.4). Ceci fait en sorte que la côte sera plus longuement exposée aux vagues particulièrement énergétiques qui ont cours durant la saison froide. Puisque les côtes du site d'étude sont très sensibles aux évènements de tempête (Lewis et Morgan, 1984; Grenier, 1993; Bernatchez et al., 2008), il est raisonnable d'anticiper que les valeurs de déplacement négatif de la côte seront à la hausse. En l'absence de modèles concluants, la vitesse à laquelle le recul s'effectuera sous l'effet des modifications environnementales attendues demeure non quantifiée. On ignore également la vitesse à laquelle la côte se rétablira après les évènements de tempête. Ainsi, si la vitesse de rétablissement était suffisante pour mitiger l'effet des changements environnementaux attendus, la vitesse d'évolution du système pourrait demeurer similaire à celle observée historiquement. Enfin, on pourrait aussi voir, sous l'effet de l'augmentation des valeurs moyennes annuelles de recul, une accélération et une accentuation des cycles de recul et d'avancées (dynamique brèche-reconstruction).

Encore une fois, l'étude ne permet pas d'analyser l'effet de la glace sur la dynamique sédimentaire et, dans ce cas, sur la dynamique des barres.

#### Infrastructures routières

Les résultats de Drejza et al. (2014) indiquent que la route est en imminence face au risque d'érosion devant certains tronçons. Les autres tronçons sont à risque d'érosion d'ici 2015-2020 à 2060-2100. La route le long de l'extrémité nord du segment d'analyse n'est pas exposée. Les résultats obtenus dans le présent projet indiquent que les conditions hydrodynamiques et glacielles prévues pour l'horizon 2055 pourraient potentiellement entraîner une augmentation des valeurs de reculs moyens annuels. Ceci pourrait faire en sorte que les dates d'exposition calculées par Drejza et al. (2014) sont devancées.

Les résultats de Drejza et al. (2014) indiquaient que la route n'était pas exposée au risque de submersion. À la lumière de l'analyse sommaire des conditions de vagues (hausse du nombre d'heures où Hs est supérieure ou égale au 95<sup>e</sup> percentile de 21 %), il est peu probable que l'exposition au risque de submersion change pour l'horizon 2055.

#### 7.10. Pointe-Lebel

#### 7.10.1. Description du segment d'analyse de Pointe-Lebel

Le site témoin de Pointe-Lebel sur la péninsule de Manicouagan appartient à la cellule hydrosédimentaire de la Pointe-Paradis (9 km) (figure 161). Devant le segment d'analyse et sur l'ensemble de la portion rectiligne de la côte qui fait face au sud, le courant de dérive principale s'effectue vers l'est. Avec la modification de l'orientation de la côte, qui dans la portion est de la cellule, fait face à l'est, la dérive principale s'effectue vers le sud. Les données de marnage de la station marégraphique la plus proche sont celles de Baie-Comeau (annexe K). Le marnage y est de 3,0 m (marée moyenne) à 4,3 m (grande marée).

Le segment d'analyse d'une longueur de 2739 m est localisé dans la portion ouest de la cellule (figure 162). Trois caméras de suivi ont été implantées sur ce segment durant la période 2008-2015<sup>7</sup> (caméra 1, 2 et 3) (figure 163, figure 164 et figure 165).

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Notons que nous disposons également, à l'extérieur du segment d'analyse, d'une caméra supplémentaire (caméra 5). Devant celle-ci, le site d'étude est caractérisé par une côte deltaïque enrochée où le haut estran est plus étroit avec une largeur d'une quinzaine de mètres. Cette caméra ne figure pas dans l'analyse.



Tirée de Drejza et al. (2014), l'étoile indique la position de la caméra

Figure 161. Cellule hydrosédimentaire de Pointe-Lebel



Figure 162. Délimitation du segment d'analyse de Pointe-Lebel



PC800 HYPERFIRE PRO

Figure 163. Prise de vue à la caméra Pointe-Lebel GLACE



Figure 164. Prise de vue à la caméra Pointe-Lebel 1 et vue oblique du littoral



Figure 165. Prise de vue à la caméra Pointe-Lebel 2 et vue oblique du littoral

Le littoral est composé en majorité de falaises meubles d'origine deltaïque d'une hauteur d'environ 15 m (suivi 2012, LDGIZC) (90,33 %). Celles-ci sont principalement actives (33,36 %) ou semi-actives (45,53 %) et seule une faible proportion est stable (11,45 %) (tableau 36). Il n'y a aucune artificialité le long du segment d'analyse. Il y a, par endroit, une tourbière sur l'arrière-côte (sommet des falaises). La côte fait face au sud. Le haut estran est généralement sableux avec, localement, des affleurements de silt prodeltaïque. Des résurgences incisent ici et là le volume de sable. La largeur du haut estran varie entre 15,76 m et 28,32 m et est en moyenne de 21,50 m (Lidar, 2010 par Van-Wierts, 2012) (tableau 31). Tout comme pour le site voisin (Baie-Saint-Ludger), le site témoin de Pointe-Lebel est caractérisé par la présence d'un très large bas estran de silt-argile et de sable (2,5 km).

	Type de côte (%)		
État de la côte et artificialité	Falaise meuble	Terrasse de plage	Total
Active ou vive ( - de 25% végé.)	33,36	0	33,36
Sans artificialité	33,36	0	33,36
Avec artificialité	0	0	0
Semi-végétalisée (entre 25 et 75% végé.)	45,53	9,67	55,19
Sans artificialité	45,53	9,67	55,19
Avec artificialité	0	0	0
Stable ou végétalisée (+ de 75% végé.)	11,45	0	11,45
Sans artificialité	11,45	0	11,45
Avec artificialité	0	0	0
Total général	90,33	9,67	100

#### Tableau 36. Caractérisation du segment d'analyse de Pointe-Lebel (2010)

Source : LDGIZC, Trait de côte de l'est du Québec numérisé à l'écran et caractérisé par la Chaire de recherche en géoscience côtière d'après les photographies obliques héliportées de septembre 2010 et des validations terrain

#### Tableau 37. Caractéristiques morphologiques du haut estran du segment d'analyse de Pointe-Lebel

	Altitude de la flexure (m)	Altitude de la ligne de rivage (m)	Largeur du haut estran (m)	Pente (%)	Volume (m³/m²)
Minimum	0,38	2,19	15,76	6,47	Nd
Maximum	1,19	4,99	28,32	22,20	Nd
Moyenne	0,82	2,98	21,50	10,16	Nd
Écart-type	0,21	0,53	3,08	2,77	Nd

Source : Lidar 2010 (Van-Wierts 2012)

#### 7.10.2. Suivi par le MTQ, Pointe-Lebel

Les cartes de dynamique hydrosédimentaire (n°78), d'exposition à l'érosion (n°78), d'exposition à la submersion (n°78) de ce site témoin ont été fournies dans le cadre du projet X.008.1 (Drejza et al., 2014). Il n'y a aucune route appartenant au MTQ dans ce secteur.

# 7.10.3. Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), Pointe-Lebel

Sur les sites situés sur la péninsule de Manicouagan, soit Pointe-Lebel et Baie-Saint-Ludger, la dynamique glacielle est influencée par la très large batture qui s'étend sur 2,5 km environ. Ici, contrairement à plusieurs sites d'étude, le pied de glace de haut estran est construit, entre autres, par l'apport de glace formée directement sur le bas estran. Ce bas estran permet la production d'une grande quantité de glace qui, transportée lors de la marée montante, s'accumule sur le haut estran. Les observations réalisées entre 2008 et 2012 montrent que ce mode de formation a compté pour 67 % des évènements de formation de glace de rive observés sur ce site (Senneville, 2014). L'exposition du bas estran aux températures de l'air plus froides que celles de l'eau lors des marées basses est favorable à la formation de glace. Aussi, lorsqu'il y a des précipitations abondantes durant la marée basse ou la marée montante, la neige permet de former de la gadoue en plus de contribuer à la formation de frasil. Enfin, notons aussi qu'à différents moments durant la saison froide, on observe que les résurgences qui s'écoulent sur la plage gèlent (figure 166, Pointe-Lebel). Aussi, ces résurgences, lorsqu'elles coulent durant la saison glacielle alors que le pied de glace est en place, peuvent transporter des sédiments et les déposer sur la glace (figure 167, Baie Saint-Ludger).

À Pointe-Lebel, la zone de formation régulière du pied de glace de haut estran couvre 80 % du haut estran. Cette zone correspond à la portion du haut estran qui est régulièrement submergé par la marée combinée aux vagues. La figure 168 présente les caractéristiques des saisons glacielles ayant pu être observées.



Figure 166. Gel des résurgences sur le haut estran, caméra 1, Pointe-Lebel



Figure 167. Accumulation sur le pied de glace de sédiments déplacés par les résurgences : exemples du 14 février 2013 et du 4 mars 2013, Baie-Saint-Ludger



Moyenne des caméras 1 et 2

Notes : En 2010-2011, sur le haut estran, il manque des données en novembre et décembre 2010. Conséquemment, la quantification des conditions (état d'englacement et protection) en nombre de jours n'est pas possible pour cette saison. Néanmoins, les dates de début et de fin de la saison glacielle ont pu être identifiées et la durée, calculée. En 2009-2010, on ne voit qu'une petite partie du bas estran. Conséquemment, il n'y a pas de bilan possible pour cette saison.

#### Figure 168. Saison glacielle, état d'englacement et niveau de protection verticale assurée par la glace de haut et de bas estran, Pointe-Lebel

#### 7.10.4. Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, Pointe-Lebel

Sur le site de Pointe-Lebel, les processus qui influencent l'évolution de la côte ne sont pas exclusivement d'origine hydrodynamique. Les relations entre les déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec les données hydrodynamiques ne sont pas valables.

# 7.10.5. Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055

En l'absence de modèles, les valeurs de déplacements négatifs moyens pour le passé récent et pour l'horizon 2055 ne sont pas quantifiées.

#### 7.10.6. Dynamique d'évolution des falaises de Pointe-Lebel

Les données d'évolution par intervalles n'ont pas pu être extraites pour le segment d'analyse de Pointe-Lebel. On sait toutefois que la côte a reculé, au cours de la période historique de 1931-1996, à une vitesse variant entre -0,1 m et -0,5 m (Bernatchez 2003) dans ce secteur. Lors de l'intervalle 2004-2015, la vitesse moyenne de recul mesurée à partir du réseau de stations de suivi (31 stations) a été de 0,26 m/an.

Le segment d'analyse est composé de falaises (tableau 36) comparables à celles observées ailleurs le long de la péninsule de Manicouagan. Ces falaises d'origine deltaïque et composées de matériaux meubles (argile, silt et sables) sont sensibles à une grande diversité de processus d'érosion, soit les processus de météorisation, les processus hydrodynamiques et les processus hydrogéologiques et gravitaires.

#### Processus de météorisation

Les processus de météorisation affectent principalement l'unité silto-argileuse. Celle-ci est particulièrement sensible aux processus de météorisation d'origine cryogénique et de dessiccation. Les sédiments libérés par les processus de météorisation peuvent ensuite mobilisés plus facilement (sous l'effet, par exemple, du ruissellement, de la gravité, des agents hydrodynamiques).

#### Processus hydrodynamiques

Les agents hydrodynamiques, quant à eux, affectent, de manières différentes, le rythme et le mode de recul des falaises en fonction de la lithostratigraphie de cette dernière. Les modes de reculs des falaises de la péninsule de Manicouagan ont été décrits par Boucher-Brossard (2012). À ce sujet, la composition de l'unité de base de la falaise de même que son épaisseur détermine en partie la sensibilité et les modes de reculs des falaises sous l'effet des vagues. En effet, les unités silto-argileuse (à la base de la falaise) sont relativement résistantes aux vagues (McCulloch et al., 2002; Forbes et al., 2004) et ont un caractère réflectif. Par contre, ces unités sont sensibles à la thermo-abrasion. Les unités sableuses (à la base des falaises), quant à elles, ne sont pas résistantes aux agents hydrodynamiques. Les sédiments sableux n'étant pratiquement pas consolidés et étant facilement mobilisables.

#### Processus hydrogéologiques

Les processus hydrogéologiques et gravitaires tels que la suffosion, les glissements de terrain, les décrochements, les coulées boueuses ou de sables (Bernatchez, 2003) comptent pour une part importante de l'évolution des falaises. La répartition et l'activation de ces processus sont influencées, entre autres, par la lithostratigraphie des falaises (Boucher-Brossard, 2012 corroborant certains travaux de la littérature scientifique).

#### 7.10.7. Rôle de la glace et perspectives d'évolution

#### Rôle de la glace

Durant la saison glacielle, les sédiments libérés par les processus de météorisation ou les processus gravitaires et hydrogéologiques s'accumulent sur le pied de glace de haut estran ou sur le pied de glace nivale (figure 167). Avec le déglacement du haut estran, les sédiments sont libérés, selon le mode de déglacement, sur place (fusion sur place du pied de glace) ou alors transportés avec la glace et sont alors intégrés dans le transit sédimentaire. Les sédiments sont ensuite intégrés à la dynamique sédimentaire. Durant la saison froide, la glace limite donc l'intégration des matériaux au transit sédimentaire. Les sédiments, plutôt que d'être déposés sur la plage et évacués dès que le niveau d'eau à la côte le permet, sont déposés sur le pied de glace. L'évolution des conditions d'englacement modifiera cette dynamique à l'échelle saisonnière. Par contre, on ignore encore de quelle manière ceci influencera la dynamique sédimentaire à l'échelle annuelle.

Aussi, à mesure que le nombre de jours où la glace offre une protection contre les vagues diminue, le nombre de jours où la falaise est exposée aux processus hydrodynamiques augmente. La diminution prévue implique donc une augmentation potentielle de l'érosion des falaises le long de la péninsule de Manicouagan en raison d'une augmentation du nombre d'heures de contact entre la mer et les falaises. À la lumière de la hausse attendue particulièrement marquée en automne et en hiver des hauteurs de vagues (annexe J), l'effet de la diminution de la protection contre les agents hydrodynamiques pourrait être significatif, toutes choses étant égales par ailleurs, et favoriser une accélération de l'érosion des falaises, et ce, tant sur les unités sableuses que silto-argileuses.

Enfin, en raison de l'augmentation du nombre de jours où la base de la falaise est exposée (diminution du nombre de jours où la glace offre une protection), les vagues pourront toucher la falaise plus fréquemment. Bernatchez (2003) expose à plusieurs reprises l'effet combiné du sapement par les vagues et des processus hydrogéologiques dans le déclenchement de mouvements de masse. En ce sens, la diminution de la protection offerte par la glace de même que l'augmentation de la hauteur des vagues pourrait favoriser le déclenchement de mouvement gravitaire.

#### Perspectives d'évolution côtière pour l'horizon 2055

A la lumière de ce portrait sur la dynamique des falaises de la péninsule de Manicouagan, il est attendu que la hausse du nombre de jours où la côte n'est pas protégée par la glace entraîne une augmentation de l'exposition de la falaise aux vagues. Ceci aura pour conséquence d'augmenter le nombre d'évènements de contact entre la mer et la falaise et donc d'augmenter le sapement basal et la thermo-abrasion à la base des falaises d'autant plus que l'on prévoit aussi une augmentation de la hauteur des vagues. Ceci entraînera une accélération du rythme d'évolution des falaises, toutes choses étant égales par ailleurs. En effet, l'importance majeure des processus hydrogéologiques et gravitaires sur le rythme d'évolution des falaises de la péninsule de Manicouagan a été discutée par Bernatchez (2003) puis par Boucher-Brossard (2012). La fréquence et la magnitude de processus ce type de processus est fonction de la lithostratigraphie et des patrons d'écoulement de même que des précipitations. L'impact des modifications des caractéristiques des précipitations pourrait entraîner des changements aux rythmes de recul des falaises qui soit plus important que ceux attribuables aux modifications des conditions glacielles. Néanmoins, la diminution de la glace pourrait influencer aussi la dynamique sédimentaire (direction, vitesses et volume du transport de sédiments). Actuellement, ce changement potentiel n'a

toujours pas fait l'objet d'une quantification et les impacts possibles sur la vitesse d'évolution des falaises n'ont pas été décrits.

# 7.11. Baie-Saint-Ludger

#### 7.11.1. Description du segment d'analyse de Baie-Saint-Ludger

Le site témoin de Baie-Saint-Ludger appartient à la cellule hydrosédimentaire de Baie-Saint-Ludger (10 km) sur les rives de la péninsule de Manicouagan, elle-même située sur la rive nord de l'estuaire maritime du Saint-Laurent (figure 169). Le courant de dérive principale s'y effectue vers l'est à l'exception du secteur localisé dans l'extrémité ouest de la cellule où le courant de dérive s'effectue plutôt vers l'ouest (Bernatchez 2003). Les dérives convergent vers l'embouchure des rivières Saint-Athanase et Saint-Athanase Ouest. Les données de marnage de la station marégraphique la plus proche sont celles de Baie-Comeau (station 2840) et sont compilées à l'annexe K. Le marnage varie entre 3,0 m (marée moyenne) et 4,3 m (grande marée).

Le site de Baie-Saint-Ludger est étudié à partir d'un segment d'analyse d'une longueur de 1895 m localisé à 700 m à l'ouest du camping de Baie-Saint-Ludger (figure 170). Le segment d'analyse est suivi à l'aide de 6 caméras permettant de suivre 3 zones durant différents moments entre 2009 et 2015 (caméra 3, caméra 1 et 6\_est et caméra 2 et 6 Ouest) (figure 171, figure 172, figure 173 et figure 174).



Tirée de Drejza et al. (2014), l'étoile indique la position des caméras

Figure 169. Cellule hydrosédimentaire de Baie-Saint-Ludger



Figure 170. Délimitation du segment d'analyse de Baie-Saint-Ludger



Figure 171. Prise de vue à la caméra Baie-Saint-Ludger 1 et 6 Est (réimplantation localisée à 150 m au sud-ouest de la caméra 1)



Figure 172. Prise de vue à la caméra de Baie-Saint-Ludger 2 et 6 Ouest (réimplantation localisée à 150 m au sud-ouest de la caméra 2)



Figure 173. Prise de vue à la caméra Baie-Saint-Ludger 3



Figure 174. Prise de vue oblique du littoral dans le secteur d'implantation des caméras 1 + 6\_Est et 2 + 6\_Ouest, relevé photographique héliporté de septembre 2010

La côte du segment d'analyse fait face au sud-est. Le littoral est composé de falaises meubles d'origine deltaïque d'une hauteur d'environ 12 m (LDGIZC, 2012, suivi 2012). Celles-ci sont toutes actives (100 %) (tableau 38) et il n'y a aucune artificialité le long du segment. Il y a, par endroit, une tourbière au sommet des falaises ce qui en influence l'hydrogéologie. Aussi, l'absence de végétation arbustive à certains endroits dans les tourbières permet aux vents de souffler la neige vers les falaises ce qui facilite la formation de couvert nival. L'absence ou la présence d'un manteau neigeux influence les processus de météorisation des falaises (Bernatchez et al. 2014). Le haut estran, d'une largeur variant entre 20,27 m et 37,05 m et d'une moyenne de 27,24 m, est généralement sableux avec, localement, des affleurements de silt prodeltaïques (tableau 39). Des résurgences incisent ici et là le sable du haut estran. L'ensemble de la péninsule de Manicouagan est caractérisé par un très large bas estran de silt-argile et de sable de 2,5 km qui influence la dynamique littorale et glacielle.

	Type de côte (%)	
État de la côte et artificialité	Falaise meuble	Total
Active ou vive ( - de 25% végé.)	100	100
Sans artificialité	100	100
Avec artificialité	0	0
Total général	100	100

#### Tableau 38. Caractérisation du segment d'analyse de Baie-Saint-Ludger (2010)

Source : LDGIZC, Trait de côte de l'est du Québec numérisé à l'écran et caractérisé par la Chaire de recherche en géoscience côtière d'après les photographies obliques héliportées de septembre 2010 et des validations terrain

	Altitude de la flexure (m)	Altitude de la ligne de rivage (m)	Largeur du haut estran (m)	Pente (%)	Volume (m <sup>3</sup> /m²)
Minimum	20,27	-0,15	2,23	5,75	Nd
Maximum	37,05	0,71	3,36	12,89	Nd
Moyenne	27,24	0,23	2,66	8,99	Nd
Écart-type	4,71	0,27	0,25	1,23	Nd

# Tableau 39. Caractéristiques morphologiques du haut estran du segmentd'analyse de Baie-Saint-Ludger

Source : Lidar 2010, Van-Wierts, 2012

#### 7.11.2. Suivi par le MTQ, Baie-Saint-Ludger

Les cartes de dynamique hydrosédimentaire (n° 77), d'exposition à l'érosion (n° 79), d'exposition à la submersion (n° 77) de ce site témoin ont été fournies dans le cadre du projet X.008.1 (Drejza et al., 2014). Il n'a y aucune route suivie par le MTQ pour ce site témoin.

# 7.11.3. Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), Baie-Saint-Ludger

Il n'y a pas de différence significative dans la dynamique glacielle de Baie-Saint-Ludger et celle de Pointe-Lebel. La section 7.10.3 décrit les particularités de la dynamique glacielle sur deux sites témoins de la péninsule de Manicouagan.

À Baie Saint-Ludger, la zone de formation régulière du pied de glace de haut estran couvre 75 % du haut estran. Cette zone correspond à la portion du haut estran qui est régulièrement submergé par la marée combinée aux vagues. Le bilan des observations pour ce site est présenté à la figure 175.



Figure 175. Saison glacielle et niveau de protection verticale assurée par la glace de haut et de bas estran, Baie Saint-Ludger

#### 7.11.4. Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, Baie-Saint-Ludger

Sur le site de Baie-Saint-Ludger, les processus qui influencent l'évolution de la côte ne sont pas exclusivement d'origine hydrodynamique. Les relations entre les déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec les données hydrodynamiques ne sont pas valables.

# 7.11.5. Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055

En l'absence de modèles, les valeurs de déplacements négatifs moyens pour le passé récent et pour l'horizon 2055 ne sont pas quantifiées.

# 7.11.6. Dynamique d'évolution des falaises de Baie-Saint-Ludger

Les données d'évolution par intervalles n'ont pas pu être extraites pour le segment d'analyse de Baie-Saint-Ludger. Par contre, l'évolution historique de la péninsule de Manicouagan a été réalisée par Bernatchez (2003) pour la période 1931-1996. L'analyse de cette période montre que la largeur de plage, dans le tronçon entre la pointe du Gros Ruisseau et le camping de Baie-Saint-Ludger, là où sont implantées les caméras de suivi, était demeurée stable avec une moyenne variant entre 20 et 23 m durant la période 1931-1965 alors qu'elle est réduite à une moyenne de 9 à 10 m en 1996. La réduction de la largeur de plage modifie la dynamique littorale. Quant à la falaise, elle était, dans ce tronçon, semi-végétalisée à végétalisée en 1931. En 1995-1996, elle était entièrement vive. Pour ce secteur, le taux moyen de recul annuel pour la période historique de 1931-1996 varie entre -0,7 m à -0,9 m (Bernatchez, 2003). L'évolution récente du segment d'analyse a été mesurée à l'aide de 7 à 23 bornes entre 2008 à 2014. La moyenne du taux de recul durant cette période de suivi a été de 0,38 m.

#### 7.11.7. Rôle de la glace et perspectives d'évolution

La dynamique littorale et glacielle n'est pas tellement différente de ce qui peut être observé à Pointe-Lebel. Les conclusions réalisées à la section 7.10.7 pour ce site s'appliquent ici aussi.

#### 7.12. Rivière Pentecôte

#### 7.12.1. Description du segment d'analyse de Rivière Pentecôte

Le site témoin de rivière Pentecôte appartient à la cellule hydrosédimentaire de la pointe aux Anglais (32,8 km), limitée au nord par la Rivière-Pentecôte et au sud par la Petite rivière de la Trinité (figure 176). La dérive sédimentaire principale s'effectue vers le sud. Les données de marnage de la station la plus proche sont celles de Port-Cartier (station 2790) et sont compilées à l'annexe K. Le marnage y varie entre 2,4 m (marée moyenne) et 3,5 m (grande marée).

Le segment d'analyse d'une longueur de 4742 m est localisé tout juste au sud de l'embouchure de la rivière Pentecôte (figure 177). Cinq des six caméras de suivi ont été retenues pour le suivi de la côte durant la période 2011-2015<sup>8</sup> (figure 178, figure 179, figure 180, figure 181 et figure 182). La côte fait face à l'est.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Sur une des caméras, la flexure est très loin de l'objectif si bien qu'on ne peut caractériser l'état d'englacement du haut estran de manière satisfaisante.


Tirée de Drejza et al., 2014, l'étoile indique la position des caméras

Figure 176. Cellule hydrosédimentaire de la pointe aux Anglais



Figure 177. Délimitation du segment d'analyse de rivière Pentecôte (cam A n'est pas inclus dans les caméras utilisées pour les relations empiriques)



Figure 178. Prise de vue à la caméra PEN\_A\_SUD et vue oblique du littoral



Figure 179. Prise de vue à la caméra PEN\_B\_FLEUVE et vue oblique du littoral



Figure 180. Prise de vue à la caméra PEN\_C\_SUD et vue oblique du littoral



Figure 181. Prise de vue à la caméra PEN\_D et vue oblique du littoral



Figure 182. Prise de vue à la caméra PEN\_E et vue oblique du littoral

Le littoral est en grande partie constitué de terrasses de plage (75,64 %) et de basses falaises meubles (18,31 %). Le littoral est en partie actif (45,02 %), en partie semi-végétalisé (20,26 %) et en partie stable (34,72 %) (tableau 40). On compte 4,15 % de côte artificialisée qui sont essentiellement répartis sur deux secteurs à proximité de l'exutoire d'un cours d'eau. Le haut estran est sableux et est d'une largeur variant entre 37 et 80 m pour une moyenne de 51 m (tableau 41). Le long du segment d'analyse, plusieurs petits cours traversent le haut estran. Le tracé des cours d'eau sur le haut estran varie en fonction du transport sédimentaire par la dérive littorale, mais aussi des crues et des pluies diluviennes (Caron, 2015). En raison des forts courants de dérive littorale, les cours d'eau ont tendance à longer de manière parallèle sur des distances plus ou moins importantes le littoral. Le bas estran est sableux et on y retrouve de nombreux blocs rocheux. la zone prélittorale est caractérisée par un système de barres sableuses festonnées (Van-Wierts et al. 2013) (figure 183).



Figure 183. Barre sableuse visible à marée basse, 12 avril 2013, Rivière Pentecôte

#### Tableau 40. Caractérisation du segment d'analyse de rivière Pentecôte (2010)

État de la côte et artificialité	Basse falaise meuble	Basse falaise meuble à terrasse de plage	Falaise meuble	Flèche littorale	Terrasse de plage	Total
Active ou vive ( - de 25% végé.)	12,43	0	0	2,41	30,19	45,02
Sans artificialité	10,90	0	0	2,41	28,63	41,94
Avec artificialité	1,53	0	0	0	1,56	3,09
Semi-végétalisée (entre 25 et 75% végé.)	3,96	0,45	0,00	2,67	13,18	20,26
Sans artificialité	3,96	0,45	0	2,67	13,18	20,26
Avec artificialité	0	0	0 0		0	0
Stable ou végétalisée (+ de 75% végé.)	1,92	0	0,53	0,00	32,27	34,72
Sans artificialité	1,11	0	0,28	0	32,27	33,66
Avec artificialité	0,81	0	0,25	0	0	1,06
Total	18,31	0,45	0,53	5,08	75,64	100

Source : LDGIZC, Trait de côte de l'est du Québec numérisé à l'écran et caractérisé par la Chaire de recherche en géoscience côtière d'après les photographies obliques héliportées de septembre 2010 et des validations terrain

### Tableau 41. Caractéristiques morphologiques du haut estran du segment d'analyse de Rivière Pentecôte

	Altitude de la flexure (m)	Altitude de la ligne de rivage (m)	Largeur du haut estran (m)	Pente (%)	Volume (m³/m²)
Minimum	-0,02	1,44	37,13	1,59	0,88
Maximum	0,42	4,66	79,57	9,13	6,83
Moyenne	0,27	3,23	51,53	6,17	1,53
Écart-type	0,09	0,68	12,12	2,04	0,95

Source : LDGIZC, Lidar 2010

## 7.12.2. Suivi MTQ, Rivière Pentecôte

Le long du segment d'analyse, le MTQ suit les secteurs correspondant aux sites-MTQ PEN-26 et PEN-27 pour les risques d'érosion et de submersion. Pentecôte correspond à l'un des deux endroits, l'autre étant celui de Longue-Pointe-de-Mingan, où la route 138 longe sur sa plus grande distance des côtes basses sableuses pour toute la section de Tadoussac à Natashquan (Van-Wierts et al. 2013).

Les cartes de dynamique hydrosédimentaire (n° 88), d'exposition à l'érosion (n° 88), d'exposition à la submersion (n° 88) et d'exposition des sites suivis par le MTQ à l'érosion (n° 171) et à la submersion (n° 171) de Rivière-Pentecôte ont été fournies dans le cadre du projet X.008.1 (Drejza et al., 2014).

# 7.12.3. Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), Rivière Pentecôte

Le site de Pentecôte est caractérisé par un large haut estran sableux. La zone touchée régulièrement par le battement de marée et le jet de rive ne couvre qu'une petite portion du haut estran. La zone de formation régulière du pied de glace de haut estran est évaluée à 25 % et la majeure partie du haut estran est recouverte durant la saison glacielle par un pied de glace nivale.

L'accumulation de glace sur le haut estran s'effectue grâce à des apports de frasil, notamment sous forme de cordon (figure 184). Le frasil s'accumule aussi en couche sur l'estran. Lorsque les vagues sont suffisamment énergétiques, cette couche est décollée et morcelée en glaçons qui s'accumulent sur le haut estran. Ponctuellement, des glaçons et des radeaux de glace qui circulent le long de la côte sur les eaux côtières sont aussi déposés sur le haut estran. Lors des évènements énergétiques, les vagues frappent le front du pied de glace et projettent des sédiments sur la surface du pied de glace. Ceci a notamment été observé durant la saison 2012-2013 notamment (figure 185). Au moment du déglacement, le haut estran est dégagé grâce à l'action thermique et mécanique des vagues. La séquence de photo du 2 mars 2013 permet d'observer la fusion de la glace au contact de l'eau (effet thermique seulement) (figure 186).

Le bas estran est souvent libre de glace durant la saison glacielle. La glace qui y a été observée est souvent de la glace de mer en circulation le long de la côte. Il n'y a pas eu de pied de glace de bas estran durant les années d'observation, et ce, malgré les saisons froides de 2013-2014 et 2014-2015. Dans ce contexte, lorsque les eaux côtières sont libres de glace, le pied de glace de haut estran est la seule entité glacielle en contact avec les vagues.

Le visionnement des images de suivi a permis d'observer la grande mobilité des barres sableuses. L'interaction entre le pied de glace de haut estran, les vagues et les barres sableuses n'est, à notre connaissance, pratiquement pas documentée. La chronologie de la saison glacielle sur le haut estran et le bas estran et sa durée de même que le niveau de développement du pied de glace observé au cours des années de suivi sont présentés à la figure 187.



Figure 184. Cordon de frasil, 25 janvier 2012, Rivière Pentecôte, caméra C\_SUD



Figure 185. Accumulation de sédiments sur le pied de glace (le 17 février 2013 sans accumulation de sédiment et durant l'épisode de vagues du 18 février 2013, avec sédiments)



Figure 186. Fusion de radeaux de glace sur place au contact de la marée (sans déplacement des radeaux), 2 mars 2013, Rivière Pentecôte



\*Moyenne des caméras B, C, D et E

Figure 187. Saison glacielle, état d'englacement et niveau de protection verticale assurée par la glace de haut et de bas estran, Rivière Pentecôte

## 7.12.4. Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, Rivière Pentecôte

Sur le site de Rivière Pentecôte, les paramètres hydrodynamiques que sont le niveau d'eau et les vagues (intégrées par le calcul du runup) sont liés aux déplacements négatifs moyens annuels mesurés sur le long du segment d'analyse. Pour toutes les relations, le R<sup>2</sup> est semblable et varie entre 0,79 et 0,83. Toutefois, c'est en intégrant le runup que les nuages de points s'étirent le long de la droite de régression linéaire. En effet, en considérant seulement le niveau d'eau, des déplacements négatifs moyens annuels de 0 à un peu moins de 1 m se produisent alors que l'on compte zéro heure d'atteinte ou de dépassement du seuil optimal trouvé. L'intégration du runup permet d'obtenir une meilleure distribution des points. Néanmoins, la meilleure relation trouvée demeure fortement dirigée par une valeur éloignée. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour l'équation intégrant tous les paramètres est de 0,1717 m.

L'exclusion de la valeur éloignée ne donne pas de résultats concluants. En effet, le niveau d'eau considéré seul ne permet pas d'expliquer les déplacements négatifs mesurés à la côte. Pour faire grimper le R<sup>2</sup> qui n'est que de 0,09 et 0,04, il est nécessaire d'intégrer les vagues en calculant le runup. Les meilleurs R<sup>2</sup> sont alors de 0,28 sans tenir compte de la glace et de 0,42 si l'on tient compte de la protection assurée par le pied de glace.

Au cours de la période de suivi 2001-2014, les évènements où le niveau d'eau additionnée au runup a atteint ou dépassé le seuil optimal se sont tous produits en dehors de la saison glacielle. En ce sens, la glace n'a pas directement assuré de protection contre l'érosion durant la période de suivi.



Figure 188. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Rivière Pentecôte



Figure 189. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Rivière Pentecôte, sans les valeurs les extrêmes

## Tableau 42. Rivière Pentecôte Évaluation de l'effet de protection offert par la glace durant la période 2001-2014 pour le site de Rivière Pentecôte

Année glacielle	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Nombre d'heures où le NETC a été supérieur au seuil optimal durant l'année	1	1	0	0	3	2	0	0	0	0	9	2	0	0
Nombre d'heures où le NETC a été supérieur au seuil optimal durant la saison glacielle	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nombre d'heure où le NETC effectif a été supérieur au seuil optimal	1	1	0	0	3	2	0	0	0	0	9	2	0	0
Ratio de protection (%)	0	0	n.a.	n.a.	0	0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0	0	n.a.	n.a.
Déplacement négatif moyen annuel observé (m)	0.16	0.04	0.03	0.01	0.30	0.73	0.08	0.15	0.16	0.43	1.63	0.22	0.11	0
Déplacement négatif moyen annuel prédit (modélisé) (m)	0.24	0.24	0.08	0.08	0.57	0.41	0.08	0.08	0.08	0.08	1.54	0.41	0.08	0.08
Différence entre « observé » et « modélisé » (m)	0.08	0.21	0.06	0.07	0.26	-0.33	0.00	-0.07	-0.08	-0.34	-0.09	0.19	-0.02	0.08
Recul prédit si l'on enlève l'effet de protection par la glace (m)	0.24	0.24	0.08	0.08	0.57	0.41	0.08	0.08	0.08	0.08	1.54	0.41	0.08	0.08
Augmentation conséquente (m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Augmentation conséquence (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## 7.12.5. Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055, Rivière Pentecôte

Les évènements de tempêtes, où le NETC est supérieur au seuil défini (2,80) ne sont survenus que rarement durant la période 1981-2010 (figure 190) et n'étaient en moyenne que de 0,34 heure par an durant cet intervalle. On prévoit que la moyenne annuelle du nombre d'heures où le NETC est supérieur au seuil augmente à 3,21 heures par année (augmentation de 830 %) pour l'horizon 2055. En considérant l'évolution de la glace, la hausse est de 1171,43 %. Avec l'augmentation de l'énergie des vagues, le rôle de protection offert par la glace augmente de 33 %, et ce, même si l'englacement prévu pour l'intervalle 2041-2070 est moins important. Sous l'effet de ces modifications aux conditions glacielles et hydrodynamiques, la valeur des reculs annuels subira une augmentation importante en passant de 0,12 m à 0,58 m.



Figure 190. Évolution du NETC et de l'érosion entre le passé récent et l'horizon 2055, Rivière Pentecôte

## 7.12.6. Dynamique d'évolution du littoral de Rivière Pentecôte

Pour l'ensemble du littoral du segment d'analyse de Rivière Pentecôte, les taux moyen d'évolution pour le segment d'analyse de Rivière Pentecôte alternent entre des valeurs positives et négatives comprises entre -1,77 m/an et 1,04 m/an (figure 192). À l'échelle historique (1930-2008), la vitesse de déplacement est de +0,13 m/an. Au fil de son évolution, le littoral subit des reculs pouvant être assez rapides. Localement, les vitesses de recul ont atteint jusqu'à -8,84 m/an (1982-1987). Néanmoins, les vitesses d'avancée sont généralement plus élevées que les vitesses de recul au cours des différents intervalles de l'analyse historique.

Le recul moyen annuel mesuré à l'aide du réseau de stations de suivi est de -0,28 m/an. Le déplacement négatif le plus important ayant été mesuré en un an s'est élevé à -4,93 m (station PEN-20A, saison 2010-2011).

Pour les terrasses de plage, Corriveau et al. (2018) ont réalisé une analyse historique (1930-2009) pour deux sections (1600 m) comprises dans les limites du segment d'analyse du présent projet (4742 m). Ceux-ci constatent que la côte est généralement en accumulation. Les vitesses d'évolution étaient, pour certains transects, légèrement négatives, mais dans la plupart des cas, positives avec des valeurs allant jusqu'à 0,6 m/an. Toutefois, la dynamique littorale de Rivière Pentecôte est caractérisée par la présence de cours d'eau de plage qui s'écoulent, sur des distances plus ou moins importantes, parallèlement à la côte. En termes d'évolution côtière, Corriveau et al. (2018) indiquent que ces cours d'eau font obstacle à l'établissement de la végétation sur le haut de plage (partie supérieure du haut estran) et donc, limitent la progression de la côte localisée dans les zones d'influence de ces cours d'eau (figure 191).



\*Tirée de Corriveau et al. (2018)

Figure 191. Végétalisation de la partie supérieure du haut estran devant les transects 11, 12 et 13 et non devant le transect 9 en aval du cours d'eau, Pentecôte

#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES



Figure 192. Vitesse de déplacement de la ligne de rivage d'après les analyses historiques, moyennes des déplacements négatifs mesurées à partir des stations de suivi et simulées, Rivière Pentecôte

## 7.12.7. Rôle de la glace et perspectives d'évolution

## Mise en perspective des modèles

Bien que les modèles développés ici soient dirigés par les valeurs extrêmes et qu'il est difficile d'expliquer l'évolution négative de la côte pour les déplacements négatifs moyens annuels de moins de 0,5 m environ (section 7.12.4), il a été possible de modéliser l'influence des évènements érosifs majeurs sur l'évolution de la côte.

## Rôle de la glace

Au cours de la période 2001-2014, tous les évènements potentiellement érosifs (NETC  $\geq$  seuil défini) se sont produits en dehors de la saison glacielle. Ceci signifie que la glace n'aurait pas assuré de protection directe contre l'érosion à la côte durant toute cette période.

Aussi, dans un environnement tel que celui de Rivière Pentecôte, où le haut estran sableux est très large et la zone de formation du pied de glace limitée, le rôle de protection du pied de glace contre l'érosion de la côte par les vagues est moins clair qu'ailleurs. Ici, le très large haut estran fait en sorte que seuls les très hauts niveaux d'eau à la côte (vagues+ niveau d'eau) peuvent atteindre la limite de la végétation dense et provoquer l'érosion de la côte. D'après ce qui a pu être observé sur les images des caméras de suivi, il semble que le développement vertical du pied de glace serait vraisemblablement insuffisant pour limiter le contact entre la côte et les vagues. Des données de suivis topographiques et la simulation des vagues à la côte à l'aide de modèles numériques tels que XBeach pourraient contribuer à une meilleure compréhension du rôle du pied de lors d'évènements potentiellement érosifs dans ce type d'environnement.

## Perspectives d'évolution côtière pour l'horizon 2055

Les changements attendus aux conditions de vagues et de glace devraient entraîner une augmentation des déplacements négatifs moyens annuels. En raison de l'entrave que constituent les cours d'eau de plage au rétablissement de la côte, on anticipe une augmentation du recul dans les zones d'influence des cours d'eau. Ailleurs, on ignore si la vitesse de rétablissement de la côte sera suffisante ou non pour maintenir la tendance historique du milieu à l'accumulation ou à la stabilité relative. Encore une fois, l'effet des modifications environnementales (vagues et glace) sur la dynamique sédimentaire (transit, profil de plage, échanges perpendiculaires, barres sableuses) n'est pas documenté. Les images de suivi montrent une grande mobilité des barres sableuses.

## Infrastructures routières

D'après les résultats de Drejza et al. (2014), la route pour le segment d'analyse de Pentecôte est généralement non exposée à l'érosion. Elle est localement en imminence face au risque d'érosion ou à risque pour les horizons 2030-2100. Les secteurs en imminence sont localisés à proximité des embouchures de cours d'eau. Les conditions glacielles et hydrodynamiques prévues pour l'horizon 2055 menacent d'autant plus ces secteurs. Pour le reste du littoral, des connaissances supplémentaires sur l'impact des changements sur la dynamique sédimentaire sont nécessaires pour ce système fortement influencé par l'importante dérive littorale et les échanges sédimentaires.

Les résultats de Drejza et al. (2014) indiquaient que la route n'était pas exposée au risque de submersion. Comme l'analyse sommaire des conditions de vagues n'indique qu'une légère augmentation du nombre d'heures où Hs est supérieure ou égale au 95<sup>e</sup> percentile (+36 %), il est peu probable que l'exposition au risque de submersion change pour l'horizon 2055.

## 7.13. Rivière-Saint-Jean

## 7.13.1. Description du segment d'analyse de Rivière Saint-Jean

Le site témoin de rivière Saint-Jean appartient à la cellule hydrosédimentaire de Longue-Pointe-de-Mingan laquelle est limitée par les rivières Magpie à l'ouest et Mingan à l'est et traversée par la rivière Saint-Jean (figure 193). Le courant de dérive principale s'effectue vers l'est le long des 42,2 km de littoral de la cellule. Les données de marnages de la station marégraphique la plus proche sont celles de Mingan (2470) et sont compilées à l'annexe K. Le marnage y est de l'ordre de 1,7 m (marée moyenne) à 2,5 m (grande marée).

Le segment d'analyse, d'une longueur de 2424 m, localisé à l'ouest de la rivière Saint-Jean a été suivi à l'aide de 7 caméras durant la période 2008-2015 (figures 94 à 01).



Tirée de Drejza et al. (2014), les étoiles indiquent les positions des caméras

Figure 193. Cellule hydrosédimentaire de Longue-Pointe-de-Mingan



Figure 194. Délimitation du segment d'analyse de rivière Saint-Jean



Figure 195. Prise de vue à la caméra Rivière-Saint-Jean 1 et Rivière-Saint-Jean 2



Figure 196. Prise de vue oblique du littoral dans le secteur d'implantation des caméras Rivière-Saint-Jean 1 et 2, relevé photographique héliporté de septembre 2010



Figure 197. Prise de vue à la caméra de Rivière-Saint-Jean 3 et vue oblique du littoral



Figure 198. Prise de vue à la caméra Rivière-Saint-Jean « SANS NOM » et GLACE



Figure 199. Prise de vue oblique du littoral dans le secteur d'implantation des caméras Rivière Saint-Jean « SANS NOM » et GLACE



Figure 200. Prise de vue à la caméra Rivière-Saint-Jean FALAISE et vue oblique du littoral


Figure 201. Prise de vue à la caméra Rivière-Saint-Jean 4 et vue oblique du littoral

Le long du segment d'analyse, le littoral fait face au sud-ouest. Les côtes ne comportent aucune artificialité et sont composées de basses falaises meubles (62,99 %) et de falaises meubles (37,01 %) actives (tableau 43). Ces falaises d'origine deltaïque sont composées d'une unité basale de silt argileux surmontée d'une unité de sable puis d'une unité indurée (ortstein) et finalement d'une unité de sol organique (Dubois et St-Pierre, 1986 ; Dubois 1977, 1979, 1980). La mise en place des sédiments des falaises date de la dernière glaciation (Dubois, 1979). Le segment d'analyse de rivière Saint-Jean est un environnement réflectif et presque toutes les marées hautes atteignent les falaises. Le haut estran est constitué d'un volume de sable avec graviers et galet reposant sur des sédiments silto-argileux. Le haut estran est d'une largeur moyenne de 23,22 m et le volume est en moyenne de 1,14 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> (tableau 44). Le bas estran est silto-argileux et couvert par endroit par des accumulations de sable plus ou moins importantes et des bancs de galets.

	Type de cô		
État de la côte et artificialité	Basse falaise meuble	Falaise meuble	Total
Active ou vive ( - de 25% végé.)	62,99	37,01	100
Sans artificialité	62,99	37,01	100
Avec artificialité	0	0	0
Total	62,99	37,01	100

#### Tableau 43. Caractérisation du segment d'analyse de rivière Saint-Jean (2010)

Source : LDGIZC, Trait de côte de l'est du Québec numérisé à l'écran et caractérisé par la Chaire de recherche en géoscience côtière d'après les photographies obliques héliportées de septembre 2010 et des validations terrain

#### Tableau 44. Caractéristiques morphologiques du haut estran du segment d'analyse de Rivière Saint-Jean

	Altitude de la flexure (m)	Altitude de la ligne de rivage (m)	Largeur du haut estran (m)	Pente (%)	Volume (m³/m²)
Minimum	-0,94	1,36	8,23	4,78	0,57
Maximum	0,71	3,35	35,34	13,96	1,65
Moyenne	-0,22	2,21	23,22	10,58	1,14
Écart-type	0,50	0,41	5,30	1,76	0,27

Source : LDGIZC, Lidar 2011

## 7.13.2. Suivi par le MTQ, Rivière Saint-Jean

Les cartes de dynamique hydrosédimentaire (n° 105), d'exposition à l'érosion (n° 105) et à la submersion (n° 105) de ce site témoin ont été fournies dans le cadre du projet X.008.1 (Drejza et al., 2014). Il n'y a aucun tronçon de route suivi par le MTQ pour ce site témoin.

## 7.13.3. Dynamiques glacielles selon les observations (caméras de suivi), Rivière Saint-Jean

Sur le haut estran, les observations réalisées par Senneville et al. (2014) indiquent que 94 % des évènements de formation du pied de glace de haut estran se sont produits par accumulation de frasil. On observe également que lorsque le développement vertical n'est pas complet, la marée submerge une partie de celui-ci. Lors de la submersion du pied de glace, l'apport en eau et/ou en frasil ou plus rarement en sarrasin (*brash ice*) contribue aussi à la croissance de celui-ci. La marée et les vagues transportent aussi des sédiments qui sont, eux aussi, déposés sur la surface du pied de glace. Lorsqu'il y a érosion des falaises, les sédiments recouvrent la portion supérieure du pied de glace. Les sédiments ne sont alors pas immédiatement l'interglaciel.

La zone de formation régulière du pied de glace de haut estran couvre 100 % du haut estran. De manière générale, pour le site témoin de Rivière Saint-Jean, on remargue que les vagues atteignent la falaise régulièrement lors des marées hautes (en l'absence de pied de glace). Cette singularité par rapport aux autres sites fait en sorte le développement du pied de glace s'effectue d'abord au pied des falaises et que le front du pied de glace descend à mesure de son développement jusqu'à ce qu'il atteigne la flexure. Pendant cette progression, la portion inférieure du haut estran est libre de glace et la réflexion des vagues se produit le long du front du pied de glace plutôt que sur les falaises. La réflexion s'effectue donc à un endroit différent le long du profil de plage selon la position du front du pied de glace. Ce mode de formation apparaît favorable à l'affouillement et l'abaissement du profil pour ce site. Les observations préliminaires rendues possibles par le suivi par caméra indiquent que la réflexion des vagues sur le front du pied de glace pourrait favoriser l'abaissement du profil au profit d'un élargissement de la plage (le sable est déplacé vers le bas du haut estran). L'absence de suivi topographique répété durant l'année ne permet pas de documenter ces interprétations. Un tel suivi serait donc très pertinent.

Au moment du dégel, les falaises libèrent une grande quantité de sédiments sous l'effet de la déstructuration et de la liquéfaction des sédiments siltoargileux en raison de du cycle annuel de gel-dégel (voir section 7.13.6). Les sédiments recouvrent alors la portion supérieure du pied de glace (figure 202). Cette couche de sédiments silto-argileux isole le pied de glace et limite la fonte sur place de la glace. Le pied de glace de haut estran est surtout démantelé par les vagues (action thermique et mécanique). Les corniches formées au front du pied de glace s'effondrent par gravité ou alors sont détruites au contact de la marée et des vagues. Sur d'autres sites d'étude, il était assez fréquent d'observer que la portion supérieure du pied de glace pouvait fondre complètement sur place. Sur le site de Rivière Saint-Jean, cette situation est rarissime puisque la marée couvre régulièrement tout le haut estran jusqu'au pied des falaises et démantèle le pied de glace. Comme le pied de glace ne fond pas sur place, les sédiments qu'il contient ne s'accumulent que peu ou pas du tout sur la plage. Les sédiments sont intégrés assez rapidement au transit sédimentaire et il n'y a pas de formation de crêtes sédimentaires postglacielles comme celles construites sur le site de Longue-Pointe-de-Mingan par exemple (Corriveau et al., 2016). Les caractéristiques singulières de la dynamique glacielle du site de Rivière Saint-Jean font en sorte qu'un suivi de la dynamique du profil de plage contribuerait aux connaissances sur les effets du pied de glace sur la dynamique des plages.

Enfin, on dispose d'une quantité d'informations somme toute encore limitée sur le pied de glace de bas estran pour le site de Rivière Saint-Jean en raison du cadrage des photographies acquises pour ce site. On sait par contre que le pied de glace de bas estran de même que le pied de glace de haut estran ne se sont pratiquement pas développés durant les années de suivi les plus chaudes. Au cours de toutes les années de suivi, c'est tout au plus 15 jours où le pied de glace de bas estran était bien développé qui ont été cumulés (2014-2015, saison « froide »). Aussi, en 2008-2009, alors que les conditions d'englacement des eaux de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent ont été près des normales (SCG, en ligne), les eaux côtières de Rivière Saint-Jean sont demeurées essentiellement libres de glace de mer. La figure 203 présente les caractéristiques des saisons glacielles ayant pu être observées (celles pour lesquelles le suivi couvre la totalité de la saison).



Figure 202. Accumulation de sédiments sur le pied de glace lors du dégel de la falaise, 29 mars 2009, Rivière Saint-Jean



\*Moyenne des caméras 3, 4, 5 et 7

Figure 203. Saison glacielle, état d'englacement et niveau de protection verticale assurée par la glace de haut et de bas estran, Rivière Saint-Jean

## 7.13.4. Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec les données de niveau de niveau d'eau, de vagues et de glace, Rivière Saint-Jean

Les déplacements négatifs moyens annuels mesurés sur le site de Rivière Saint-Jean ne sont pas uniquement le résultat des conditions hydrodynamiques. Plusieurs autres processus, notamment hydrogéologiques et cryogéniques, contribuent au recul des falaises de ce site. Ceux-ci sont décrits à la section 7.13.6.

## 7.13.5. Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055, Rivière-Saint-Jean

En l'absence de modèles, les valeurs de déplacements négatifs moyens pour le passé récent et pour l'horizon 2055 ne sont pas quantifiées.

## 7.13.6. Dynamique d'évolution des falaises de Rivière Saintjean et influence de la glace d'estran

Le site de Rivière Saint-Jean connaît les taux de recul annuel les plus élevés du Québec maritime (Bernatchez et Dubois, 2004; Boucher-Brossard, 2012). L'évolution historique des falaises du segment d'analyse de Rivière Saint-Jean est marquée par une accélération des vitesses de recul (figure 204). Cette accélération a aussi été observée sur les secteurs d'études de Boucher-Brossard (2012). Les vitesses de recul historiques de 1948(49)-2005 sont comprises entre -0,93 m/an et -0,56 m/an (figure 204). La vitesse de recul mesurée à l'aide du réseau de stations de suivi entre 2000-2014 s'élève quant à elle à 2,56 m (figure 204). Les paragraphes suivants présentent les différents processus qui occasionnent le recul des falaises.

#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES



Figure 204. Vitesse de déplacement de la ligne de rivage d'après les analyses historiques, moyennes des déplacements négatifs mesurées à partir des stations de suivi, Rivière Saint-Jean

## Processus hydrogéologiques et gravitaires

La modification de la pente et de la morphologie des falaises favorise les processus gravitaires. Ces processus se manifestent par des coulées de sable sec et des effondrements. La répartition des processus hydrogéologiques et gravitaires est, quant à elle, fonction des écoulements d'eau souterrains et de la lithostratigraphie des falaises. Ces processus entraînent de la suffosion, du ravinement et des glissements rotationnels.

## Processus hydrodynamiques

En l'absence de gel, les sédiments cohésifs de l'unité silto-argileuse sont peu affectés par les agents hydrodynamiques. En effet, les sédiments y sont résistants et agissent telle une structure rigide en réfléchissant l'énergie des vagues (McCulloch et al., 2002; Forbes et al., 2004). Cependant, une fois l'unité silto-argileuse gelée, les processus hydrodynamiques entraînent la formation d'encoches de thermo-érosion. L'analyse du suivi par caméras dans Bernatchez et al. (2014), a permis d'identifier que la thermo-érosion a été observée lors de chacune des marées hautes de vives-eaux hivernales lorsqu'une onde de gel avait pénétrée dans les sédiments. Les marées de vives-eaux, qui sont récurrentes (2 fois par mois), sont la cause principale de la thermo-érosion. Les événements sporadiques de surcotes ou de hautes vagues peuvent augmenter la fréquence de ce processus. Rappelons que la thermo-érosion est occasionnée par un transfert de chaleur entre les vagues et les sédiments gelés (Aré 1988; Günther et al. 2013). Le phénomène peut survenir tant que le pied de glace n'est pas suffisamment épais pour limiter le contact entre la mer et les falaises.

## Processus cryogéniques

Les processus cryogéniques, pour leur part, modifient la structure des siltsargiles. La création de joints et de lentilles de glace dans les plans de faiblesse et fissures délimite des polyèdres qui s'effondrent lorsque la glace ne les maintient plus en place. Notons que la dessiccation des silt-argiles mène aussi au détachement de polyèdres qui seront délogés par les vagues ou par la gravité. La pluie peut aussi déloger les sédiments précédemment isolés.

On sait également que les silts-argiles sont sensibles au gel qui déstructure complètement les sédiments qui se liquéfient alors au moment du dégel. Une des conclusions de Bernatchez et al. (2014) est qu'une part importante de l'érosion des falaises est directement associée à l'onde de gel et au cycle annuel de gel-dégel. L'évolution de l'unité silto-argileuse est déterminante dans le réajustement du profil de la falaise et son mode de recul. C'est donc

en partie le déséquilibre induit par l'onde de gel et le dégel printanier qui déclenche le réajustement de la falaise et le recul du trait de côte (sommet de la falaise). La profondeur de sédiment silto-argileux affecté par le gel a été étudiée par Bernatchez et al. (2014) et est évalué à 1,40 m. Notons que ces travaux ont permis d'analyser l'évolution de l'onde de gel pour les conditions climatiques futures et prédisent une diminution de l'épaisseur de sédiment affecté par le gel (et donc voué à être érodé lors des dégels attribuables aux redoux ou dégel printanier) qui est variable selon les scénarios (figure 205). Pour 3 des 8 simulations utilisées dans le cadre de ce projet, la diminution n'est pas significative (tableau 45). Pour les 5 autres simulations, la baisse prédite est significative et se situe entre 19 cm et 42 cm. La moyenne de tous les scénarios est de -21 cm. Les conséquences de cette évolution devraient être, somme toute, assez limitées d'autant plus que d'autres processus liés aux conditions météorologiques pourraient compenser pour cette diminution (ex. dessiccation durant une saison chaude plus longue alors que la saison froide est plus courte).



Figure 205. Évolution de la profondeur de sédiments atteints par le gel (m) selon les 8 scénarios utilisés dans Bernatchez et al. (2014), Rivière Saint-Jean

	Pente	Δ 1980-2080 (cm)
Scénario 1	-0,0006	-6
Scénario 2	-0,0019*	-19
Scénario 3	-0,0013	-13
Scénario 4	-0,0025*	-25
Scénario 5	-0,0010	-10
Scénario 6	-0,0022*	-22
Scénario 7	-0,0030*	-30
Scénario 8	-0,0042*	-42

Tableau 45. Évolution de la profondeur de sédiments atteints par le gel (m) selon les 8 scénarios utilisés dans Bernatchez et al. (2014), Rivière Saint-Jean

\*Tendance significative

### Mode de recul des falaises

Le **mode** de recul des falaises, du pied au sommet, dépend de la lithostratigraphie de celles-ci. Devant la caméra 3 par exemple, la falaise est essentiellement composée d'une unité silto-argileuse surmontée d'une couche organique (tourbe). Dans ce cas, l'érosion de l'unité silto-argileuse s'effectue d'abord et laisse la couche de tourbe suspendue au-dessus du vide jusqu'à ce qu'elle s'effondre. Devant la caméra 4, il y a une unité de sable entre l'unité silto-argileuse et la tourbe. Dans ce cas, l'érosion de l'unité de silto-argileuse induit un réajustement de la pente d'équilibre de l'unité sableuse puis l'effondrement par gravité de l'unité de tourbe. La description complète des modes de reculs des falaises pour Rivière Saint-Jean est disponible dans Boucher-Brossard (2012).

## 7.13.7. Rôle de la glace et perspectives d'évolution

### Rôle de la glace

#### Couvert nival des falaises

Les travaux de Boucher-Brossard (2012) mettent en lumière la variabilité spatiale des caractéristiques des falaises de Rivière Saint-Jean. En fonction de la pente des falaises, de la végétation qui occupe leur sommet (tourbière herbacée ou arborescente), de l'orientation des falaises, de la morphologie de la falaise (concavités favorables à l'accumulation telles que les cicatrices de glissement ou les zones de ravinement), il a été observé que l'enneigement des falaises diffère latéralement. Par exemple, dans les secteurs où la végétation sommitale est basse (ex. tourbière herbacée), les vents dominants soufflant vers le large poussent la neige et alimentent le couvert nival sur les falaises. La présence ou l'absence de pied de glace influence aussi l'enneigement des falaises. Lorsqu'il est présent, il permet au couvert nival de s'y appuyer, en plus de réduire la hauteur de falaise à couvrir par la neige. La présence d'un pied de glace à la base de la falaise évite aussi que les vagues délogent la neige accumulée à la base de la falaise, déstabilisent le couvert neigeux et, se faisant, dénudent la falaise de son couvert neigeux. Comme le couvert neigeux isole les falaises des conditions atmosphériques environnantes (rayonnement solaire, température de l'air), sa présence ou son absence influence l'évolution de l'onde de gel et la fréquence et l'intensité des processus de météorisation liés aux alternances gel-dégel.

#### Thermo-érosion

On prévoit pour l'horizon 2055 une diminution du nombre de jours de protection complète contre les agents hydrodynamiques par la glace d'estran (39 %) et une augmentation du nombre d'heures où Hs est supérieure ou égale au 95<sup>e</sup> percentile (207 %). Ceci implique l'augmentation de la fréquence des évènements de thermo-érosion. Les données actuellement disponibles ne permettent pas de savoir si l'augmentation de la thermo-érosion pourrait être suffisamment importante pour modifier la chronologie ou les modes de recul de l'ensemble du profil de la falaise. Actuellement, le réajustement du profil de la falaise s'amorce avec le dégel printanier de l'unité silto-argileuse auquel réagissent par gravité les unités sus-jacentes. On ignore encore si l'augmentation de la fréquence des évènements de thermo-érosion pourrait entraîner la formation d'encoches plus profondes qui déstabiliserait le profil durant la saison froide, modifiant ainsi le moment et les processus par lesquels le profil de la falaise s'ajuste (ex. effondrement de la portion de sédiment audessus de l'encoche durant la saison froide). Bien que ce scénario soit

envisageable, il nous apparaît actuellement peu probable puisque la profondeur des encoches de thermo-érosion ayant pu être observée semblait trop faible pour déstabiliser l'équilibre du profil de la falaise, particulièrement alors qu'elle est gelée. Des mesures de terrain et des observations supplémentaires seraient encore nécessaires pour confirmer ou infirmer cette possibilité.

#### Morphodynamique du haut et du bas estran

Enfin, comme sur les autres sites, les changements prévus aux conditions hydrodynamiques et glacielles pourraient entraîner des changements à la dynamique sédimentaire. Des données topographiques à haute résolution temporelle seraient nécessaires pour comprendre l'effet de la glace sur la dynamique sédimentaire. L'abaissement du profil de plage, par exemple, aurait pour effet d'augmenter la fréquence de contact entre la mer et les falaises ce qui pourrait occasionner une augmentation de l'érosion (par ex., Lee, 2008).

## Perspectives d'évolution côtière pour l'horizon 2055

Malgré les considérations réalisées jusqu'ici, l'évolution de la répartition et de la fréquence des mouvements gravitaires de grande ampleur demeure une composante majeure dans la vitesse de recul des falaises à moyen et long terme. À cette échelle temporelle, ces processus sont responsables de reculs plus importants que les reculs attribuables aux processus qui affectent toute la falaise et qui sont actifs sur un cycle annuel (thermo-érosion, dessiccation, dégel printanier). L'intégration des mouvements de masse est problématique et les auteurs ont plutôt développé des modèles pour prédire le recul des talus gouvernés par ce type de processus en leur donnant un caractère aléatoire par exemple (Hall et al. 2002 ; Lee et al. 2002). Ainsi, dans un contexte de changement climatique, la capacité de produire des modèles qui intègrent l'éffet des modifications des températures de l'air et des précipitations, incluant l'évolution spatiale et temporelle du couvert nival, sur les processus hydrodynamiques s'avère fondamentale pour pouvoir anticiper l'évolution de la vitesse de recul des falaises de Rivière Saint-Jean.

## 7.14. Longue-Pointe-de-Mingan

## 7.14.1. Description des segments d'analyse de Longue-Pointe-de-Mingan

Le site de Longue-Pointe-de-Mingan fait l'objet de suivi depuis plusieurs années. En plus des caméras de suivi, ce site a fait l'objet de campagne de terrain pour l'acquisition de données topographiques (profil de plage au DGPS, lidar). Les côtes ont aussi été instrumentées pour le suivi des conditions hydrodynamiques (capteurs de pression RBR, AWAC). Les données présentées dans cette section proviennent donc aussi, quelques fois, de d'autres projets de recherche.

Le site témoin de Longue-Pointe-de-Mingan appartient à la cellule hydrosédimentaire de du même nom laquelle est limitée par les rivières Magpie à l'ouest et Mingan à l'est et traversée par la rivière Saint-Jean (figure 206 et figure 207). Le courant de dérive principale s'effectue vers l'est le long des 42,2 km de littoral de la cellule (figure 206 et figure 207). Les données de marnage de la station marégraphique la plus proche sont celles de Mingan (2470) et sont compilées à l'annexe K. Le marnage y est de 1,7 m (marée moyenne) à 2,5 m (grande marée).

Trois segments d'analyse ont été étudiés dans le secteur de Longue-Pointede-Mingan (figure 208 et figure 209). Ceux-ci sont décrits aux sous-sections suivantes.



Tirée de Drejza et al., 2014, les étoiles indiquent les positions des caméras

Figure 206. Cellule hydrosédimentaire de Longue-Pointe-de-Mingan (1/2)



Tirée de Drejza et al., 2014, l'étoile indique la position des caméras

Figure 207. Cellule hydrosédimentaire de Longue-Pointe-de-Mingan (2/2)



Figure 208. Délimitation des segments d'analyse de Longue-Pointe-de-Mingan B\_Est et B\_Ouest



Figure 209. Délimitation du segment d'analyse de Longue-Pointe-de-Mingan D

## 7.14.1.1. Longue-Pointe-de-Mingan, D

Le segment d'analyse de Longue-Pointe-de-Mingan\_D, d'une longueur de 2546 m et localisé à l'est de la rivière Saint-Jean, a été suivi à l'aide d'un total de 5 caméras au cours de la période 2011-2013 (figure 210, figure 211, figure 212, figure 213 et figure 214).



Figure 210. Prise de vue à la caméra LPM\_D\_Ouest



Figure 211. Prise de vue oblique du littoral dans le secteur d'implantation de la caméra LPM\_D (segment d'analyse 1), relevé photographique héliporté de septembre 2010



Figure 212. Prise de vue à la caméra LPM\_C\_Ouest et LPM\_RSJ\_Ouest, premier segment d'analyse



Figure 213. Prise de vue aux caméras LPM\_C\_Est et LPM\_RSJ\_C\_Est, premier segment d'analyse



Figure 214. Prise de vue oblique du littoral dans le secteur d'implantation des caméras LPM\_C\_Est et LPM\_C\_Ouest, RSJ\_Est et RSJ\_Ouest, premier segment d'analyse, relevé photographique héliporté de septembre 2010

La côte du segment d'analyse de Longue-Pointe-de-Mingan D est composée de terrasses de plage et de falaises. Il n'y avait pas d'artificialité le long de ce segment en 2010 (images héliportées septembre 2010). La côte fait face au sud-sud-ouest. Le haut estran est sableux et est plus étroit que sur les segments B\_est et B\_ouest. Sa largeur varie entre 31 m et 56 m pour une moyenne de 42 m. La pente est assez importante avec une valeur moyenne de 6,79 %.

	Altitude de la flexure (m)	Altitude de la ligne de rivage (m)	Largeur du haut estran (m)	Pente (%)	Volume (m³/m²)
Minimum	-0,52	1,31	30,51	4,78	0,99
Maximum	-0,33	2,76	56,13	8,59	4,22
Moyenne	-0,44	2,40	42,37	6,79	1,62
Écart-type	0,07	0,52	8,72	1,17	1,07

#### Tableau 46. Caractéristiques morphologiques du haut estran du segment d'analyse de Longue-Pointe-de-Mingan D

Source : LDGIZC, Lidar 2008, ATTENTION : Les polygones couvrent environ 40 % du segment d'analyse.

## 7.14.1.2. Longue-Pointe-de-Mingan, B\_ouest

Le segment d'analyse suivant est adjacent au segment B\_est et s'étire vers l'ouest sur 2791 m (figure 209). Celui-ci est suivi à l'aide de la caméra B pointant vers l'ouest au cours de la période 2012-2015 (figure 215).



Figure 215. Prise de vue à la caméra LPM\_B\_Ouest

Le segment d'analyse de Longue-Pointe-de-Mingan B\_ouest est entièrement constitué de terrasse de plage et libre de toute artificialité. La majorité du littoral était en accumulation (32,95 %) ou stable (50,06 %) selon la caractérisation de 2010 (tableau 47). On compte alors 16,98 % de côte active. La côte fait face au sud. Le haut estran est sableux et sa largeur est assez homogène et variait entre 66 et 70 m pour une moyenne de 68 m selon les mesures de 2008 (tableau 47). La pente du haut estran est plus douce que sur le segment adjacent avec une moyenne de 4,39 %.

Tableau 47. Caractérisation du segment d'analyse de Longue-Pointe-de-Mingan B\_ouest (2010)

	Type de côte	
État de la côte et artificialisation	Terrasse de plage	Total
Accumulation (progradation)	32,95 %	32,95 %
Sans artificialité	32,95 %	32,95 %
Avec artificialité	0 %	0 %
Active ou vive (- de 25 % végé.)	16,98 %	16,98 %
Sans artificialité	16,98 %	16,98 %
Avec artificialité	0 %	0 %
Stable ou végétalisée (+ de 75 % végé.)	50,06 %	50,06 %
Sans artificialité	50,06 %	50,06 %
Avec artificialité	0 %	0 %
Total	100 %	100 %

Source : LDGIZC, Trait de côte de l'est du Québec numérisé à l'écran et caractérisé par la Chaire de recherche en géoscience côtière d'après les photographies obliques héliportées de septembre 2010 et des validations terrain

	Altitude de la flexure (m)	Altitude de la ligne de rivage (m)	Largeur du haut estran (m)	Pente (%)	Volume (m <sup>3</sup> /m²)
Minimum	-0,39	2,69	65,98	4,29	1,99
Maximum	-0,14	2,76	69,96	4,49	2,23
Moyenne	-0,26	2,72	67,97	4,39	2,11
Écart-type	0,18	0,04	2,82	0,14	0,17

## Tableau 48. Caractéristiques morphologiques du haut estran du segment d'analyse de Longue-Pointe-de-Mingan B\_ouest

Source : LDGIZC, Lidar 2008. ATTENTION : Calculs effectués sur seulement 2 polygones couvrant environ 20 % du segment d'analyse seulement

## 7.14.1.3. Longue-Pointe-de-Mingan, B\_Est

Le premier segment d'analyse est celui de Longue-Pointe-de-Mingan B\_Est. Il est situé à l'ouest du village et s'étire sur 3294 m (Mingan centre) (figure 208). Celui-ci est suivi à l'aide de la caméra B pointant vers l'est au cours de la période 2012-2015 (figure 216).



Figure 216. Prise de vue à la caméra LPM\_B\_Est

Le segment d'analyse de Longue-Pointe-de-Mingan B\_Est est entièrement composé de terrasses de plage. Celles-ci sont en partie actives (29,33 %), mais en majorité stable (42,75 %) ou en accumulation (27,92 %). Il n'y a pas d'artificialité sur le littoral de ce segment d'analyse et la côte fait face au sud. Le haut estran est sableux et est d'une largeur variant entre 15 m et 61 m pour une moyenne de 34 (tableau 49). La pente du haut estran est assez prononcée avec une moyenne de 7,12 %.

	Altitude de la flexure (m)	Altitude de la ligne de rivage (m)	Largeur du haut estran (m)	Pente (%)	Volume (m <sup>3</sup> /m²)
Minimum	-0,47	1,99	15,12	2,75	0,17
Maximum	1,87	3,09	61,14	12,62	2,20
Moyenne	0,22	2,53	34,16	7,12	1,25
Écart-type	0,78	0,33	15,68	2,84	0,67

 Tableau 49. Caractéristiques morphologiques du haut estran du segment

 d'analyse de Longue-Pointe-de-Mingan B\_Est

Source : LDGIZC, Lidar 2008

## 7.14.2. Suivi par le MTQ, Longue-Pointe-de-Mingan

Aucun tronçon ne fait l'objet de suivi par le MTQ le long des segments B\_Est et B\_Ouest (inspection 2011, document Excel, MTQ Côte-Nord). Par contre, ce secteur a fait l'objet d'une analyse dans le cadre de Corriveau et al. (2016) en raison de la faible distance entre la route et le trait de côte. Le long du segment d'analyse D, le MTQ effectue le suivi des sites MIN-20 et MIN-21 (inspection 2011, document Excel, MTQ Côte-Nord).

Les cartes de dynamique hydrosédimentaire (n° 106 et n° 107), d'exposition à l'érosion (n° 106 et n° 107) et à la submersion (n° 106 et n° 107) et d'exposition des sites suivis par le MTQ à l'érosion (n° 188 et n° 189) et à la submersion (n° 188 et n° 189) de ce site témoin ont été fournies dans le cadre du projet X.008.1 (Drejza et al., 2014).

# 7.14.3. Dynamique glacielle selon les observations (caméras de suivi), Longue-Pointe-de-Mingan

Les conditions de vagues et les conditions atmosphériques sont les mêmes pour les trois segments d'analyse. Cependant, en raison des différences morphologiques de l'estran, la zone de formation régulière du pied de glace de haut estran ne couvre pas la même proportion sur les trois segments. À Longue-Pointe-de-Mingan B\_Est la pente est plus forte (7,12 %) et le haut estran plus étroit (34 m) que sur les deux autres segments d'analyse (D : 42 m et 6,79 %; B\_Ouest : 68 m et 4,39 %). Avec les vagues plus énergétiques du début de l'hiver, le niveau d'eau à la côte (marée, surcote, vagues) rejoint régulièrement la ligne de rivage devant la caméra du segment B\_Est et la zone de formation régulière du pied de glace couvre 100 % du haut estran. Avec des hauts estrans plus larges et des pentes moins fortes, les zones de formation régulière couvrent 30 % et 40 % respectivement sur les segments B\_Ouest et D.

Sur le haut estran, la formation du pied de glace s'effectue en partie grâce à des apports en frasil en suspension dans la colonne d'eau (figure 217) et de jeunes glaces; les conditions hydrodynamiques généralement énergétiques y étant favorables. Le frasil s'accumule sur le haut estran surtout sous la forme de cordons (figure 218). Occasionnellement, on observe la formation d'une succession de cordons (figure 219). Dans une moindre mesure, des petits glaçons ou petits radeaux sont eux aussi intégrés au pied de glace. Ils proviennent de lisières/bandes de glace (sarrasins) qui circulent le long de la côte. Parfois, ce sont des blocs de glace arrachés au pied de glace lui-même qui sont redéposés plus haut sur pied de glace notamment lorsque les conditions hydrodynamiques sont énergétiques et que le niveau d'eau est haut.



Figure 217. Frasil sur les eaux côtières, 28 décembre 2013, Longue-Pointe-de-Mingan B\_Est



Figure 218. Cordon de frasil et frasil dans les eaux côtières, 14 décembre 2013, Longue-Pointe-de-Mingan B\_Est (caméra B\_Large)



Figure 219. Accumulation de frasil en une succession de cordons sur le haut estran, 29 novembre, Longue-Pointe-de-Mingan B\_Est

En l'absence de pied de glace de bas estran, les vagues frappent assez régulièrement le front du pied de glace ce qui est favorable à la croissance verticale du pied de glace si ces vagues sont chargées de glace et qui est aussi favorable à l'intégration de sédiment sur le pied de glace (figure 220 et figure 221). Pour certaines des caméras, l'épaisseur du pied de glace combiné à l'angle de la caméra fait en sorte que la partie devant le front du pied de glace se trouve dans « l'ombre » (figure 220). Il semble toutefois que le front du pied de glace aurait été régulièrement localisé un peu en haut de la flexure. Cette situation laisse la partie basse du haut estran libre de glace dans une zone où les vagues réfléchissent contre le front du pied de glace ce qui constitue une configuration favorable au phénomène d'affouillement.



Figure 220. Vagues frappant le front du pied de glace et submersion du pied de glace, 12 février 2013, Longue-Pointe-de-Mingan B\_est (caméra B\_large)



Figure 221. Accumulation de sédiment sur le pied de glace de haut estran, 4 mars 2013, Longue-Pointe-de-Mingan B (caméra vers de large positionnée à la limite B\_Est et B\_Ouest)

Lors de la phase de dégel, le déglacement s'effectue sous l'action mécanique et thermique des vagues. Au cours des années de suivi, les conditions hydrodynamiques ont été généralement plus calmes lors du déglacement que lors de l'englacement. En conséquence, la partie la plus haute du pied de glace de haut estran a fondu sur place. Aussi, la présence de sédiments sur la surface du pied de glace modifie l'albédo du pied de glace ce qui permet au rayonnement de faire fondre la glace plus rapidement lorsque la couche de sédiments est mince. Par contre, lorsque la couche de sédiments devient trop épaisse, celle-ci isole le pied de glace. Lors des visites de terrain effectuées au printemps, il y avait de la glace enfouie sous d'importantes couches de sables. Par la suite, la fonte complète de la glace laisse une plage à l'allure chaotique. On observe notamment des dépressions liées à la fonte de la glace enfouie (formation de type kettles) (figure 222 et figure 223) ou des crêtes de sédiments post-glacielles (figure 224 et figure 225).



Figure 222. Dépressions sur la plage formées à la suite de la fonte de blocs de glace enfouis, 2 mai 2014, Longue-Pointe-de-Mingan B



Figure 223. Dépressions sur la plage formées à la suite de la fonte de blocs de glace enfouis, 2 mai 2014, Longue-Pointe-de-Mingan B



Figure 224. Crête de sédiments post-glacielle, 13 mai 2014, Longue-Pointe-de-Mingan B\_Est



Figure 225. Crête de sédiments post-glacielle, 9 mai 2014, Longue-Pointe-de-Mingan (caméra vers de large positionnée à la limite B\_Est et B\_Ouest)

La dynamique glacielle sur le bas estran est similaire pour les trois segments d'analyse. On constate que les vents dominants qui soufflent vers le large ne favorisent pas le développement du pied de glace de bas estran. Même si les barres sableuses, les plus proches du haut estran, pourraient contribuer à la stabilité du pied de glace de bas estran en fournissant des zones d'ancrage à la glace, le pied de glace de bas estran ne s'est que peu ou pas du tout développé durant les saisons de suivi (2012-2013 (chaud), 2013-2014 et 2014-2015 (froid)) (figures 226, 227 et 228). À aucun moment, le pied de glace de bas estran n'atteint et ne maintient une concentration de 100 % sur plusieurs jours consécutifs. En ce sens, si l'on se réfère à la définition du pied de glace de bas estran qui indique que celui-ci est généralement stable et ne se déplace pratiquement pas horizontalement, la glace observée s'apparente

à de la glace de mer en mouvement s'accumulant momentanément sur le bas estran. Le développement du pied de glace de bas estran, même durant les saisons froides, a donc été extrêmement limité. Sur le bas estran, lorsqu'il est découvert à marée basse, de minces couches de glace y sont parfois formées. Ceci contribue à la formation de sarrasin souvent observée le long de la côte (sans la zone de bas estran surtout, eau libre au large très souvent). Les figures 229, 230 et 231 présentent les caractéristiques des saisons glacielles ayant pu être observées (celles pour lesquelles le suivi couvre la totalité de la saison).

#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES



Figure 226. Concentration de glace sur le bas estran, Longue-Pointe-de-Mingan B\_Est



Figure 227. Concentration de glace sur le bas estran, Longue-Pointe-de-Mingan B\_Ouest

#### INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES



Figure 228. Concentration de glace sur le bas estran, Longue-Pointe-de-Mingan D


Figure 229. Saison glacielle, état d'englacement et niveau de protection verticale assurée par la glace de haut et de bas estran, Longue-Pointe-de-Mingan B\_Est



Figure 230. Saison glacielle, état d'englacement et niveau de protection verticale assurée par la glace de haut et de bas estran, Longue-Pointe-de-Mingan B\_Ouest



Figure 231. Saison glacielle, état d'englacement et niveau de protection verticale assurée par la glace de haut et de bas estran, Longue-Pointe-de-Mingan D

# 7.14.4. Mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi avec les données de niveau d'eau, de vagues et de glace, Longue-Pointe-de-Mingan

La mise en relation des déplacements négatifs mesurés aux stations de suivi de Longue-Pointe-de-Mingan avec les conditions hydrodynamiques et glacielles ne donne pas de résultats concluants (figure 232 à 237). On sait pourtant que les agents hydrodynamiques y sont les seuls agents responsables du déplacement négatif de la ligne de rivage et du trait de côte. Corriveau et al. (2018) indiguent que les évènements érosifs sont survenus lorsque la hauteur des vagues au large était élevée. Les travaux de Corriveau et al. (2016 et 2018) ont permis de mettre en lumière l'importante variabilité spatiale et temporelle des caractéristiques morphologiques de la plage de même que l'importante dérive sédimentaire sur l'estran. Ils ont pu observer que l'évolution du trait de côte est conditionnée par les échanges sédimentaires entre les barres sableuses prélittorales, les cordons de bas estran et la plage. Le survol de l'analyse historique de l'évolution du littoral pour les segments d'analyse de Longue-Pointe-de-Mingan (section 7.14.6) illustre aussi en partie ces constats (accolement cordons devant les segments B). En ce sens, l'approche méthodologique utilisée ici ne permet pas d'intégrer la dynamique sédimentaire et comme elle s'avère fondamentale dans l'évolution de la côte à Longue-Pointe-de-Mingan, les résultats ne sont pas concluants.



Figure 232. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Longue-Pointede-Mingan B\_Est



Figure 233. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Longue-Pointede-Mingan B\_Est, sans les valeurs les extrêmes



Figure 234. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Longue-Pointede-Mingan B\_Ouest



Figure 235. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Longue-Pointede-Mingan B\_Ouest, sans les valeurs les extrêmes



Figure 236. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Longue-Pointede-Mingan D



Figure 237. Relations entre les déplacements négatifs moyens annuels et les paramètres hydrodynamiques de Longue-Pointede-Mingan D, sans les valeurs les extrêmes

# 7.14.5. Estimation du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison de la réduction du couvert de glace pour l'horizon 2055, Longue-Pointe-de-Mingan

En l'absence de modèles concluants, il n'a pas été possible d'estimer les changements à la valeur moyenne des reculs annuels pouvant être liés aux modifications attendues des conditions de glaces et de vagues.

# 7.14.6. Dynamique d'évolution du littoral de Longue-Pointede-Mingan

Pour le segment d'analyse de Longue-Pointe-de-Mingan D, on note que l'évolution moyenne du littoral a été négative pour tous les intervalles d'analyse historique et des vitesses de recul allant jusqu'à -4,98 m/an ont été mesurées localement (figure 239). Néanmoins, le littoral peut aussi progradé. Par exemple, au cours de l'intervalle 1997-2005, la vitesse de déplacement mesurée localement (pour un transect) a été de 5,13 m/an. Le segment de Longue-Pointe-de-Mingan B\_Est, dans son ensemble, a lui aussi été négatif pour tous les intervalles analysés à l'exception du dernier intervalle (1997-2005) où la vitesse de déplacement moyenne pour le segment était de 0,31 m/an (figure 240). Enfin, on remarque, pour le segment B\_Ouest (immédiatement en amont du segment B\_Est par rapport au sens de la dérive) que l'évolution a plutôt été marquée par l'alternance entre des intervalles de recul et d'avancée. On remarque également que le dernier intervalle (1997-2005) est caractérisé par des vitesses de déplacement du littoral fortement positives (figure 241). Il s'agit de l'effet direct de l'accolement d'un cordon sableux ayant permis à la ligne de rivage de progresser rapidement vers le large. À ce sujet, on remarque que le haut estran du segment d'analyse de Longue-Pointe-de-Mingan B Est est en accumulation depuis les dernières années (2014-2017) à mesure que le corps sableux qui s'est accolé à la plage un peu plus à l'ouest migre vers l'est (figure 238). Ainsi, au cours de la période de suivi par caméra 2013-2015, le haut estran était plus étroit qu'aujourd'hui (2017). Alors que le haut estran était étroit devant le segment B\_Est, l'analyse des volumes sédimentaires du haut estran pour la saison 2013-2014 (DGPS et Lidar) montre que le littoral devant le segment B\_Est était caractérisé par des volumes de plage inférieurs aux volumes des zones adjacentes (centré sur compartiment LPM\_29, figure 54 dans Corriveau et al., 2016). Ceci a permis aux évènements de tempête d'y générer des reculs culminants à plus de 20 m entre mai 2013 et septembre 2014 seulement.



Figure 238. Migration d'un corps sableux vers l'est (dans le sens de la dérive littorale) et élargissement du haut estran entre 2014 et 2017, Longue-Pointe-de-Mingan B\_Est et B\_Ouest



Données : LDGIZC, Évolution historique réalisée par (Bernatchez et al. 2012d)

Figure 239. Vitesse de déplacement de la ligne de rivage d'après les analyses historiques, moyennes des déplacements négatifs mesurées à partir des stations de suivi, Longue-Pointe-de-Mingan D



Données : LDGIZC, Évolution historique réalisée par (Bernatchez et al. 2012d)

Figure 240. Vitesse de déplacement de la ligne de rivage d'après les analyses historiques, moyennes des déplacements négatifs mesurées à partir des stations de suivi, Longue-Pointe-de-Mingan B\_Est



Données : LDGIZC, Évolution historique réalisée par (Bernatchez et al. 2012d)

Figure 241. Vitesse de déplacement de la ligne de rivage d'après les analyses historiques, moyennes des déplacements négatifs mesurées à partir des stations de suivi, Longue-Pointe-de-Mingan B\_Ouest

# 7.14.7. Rôle de la glace et perspectives d'évolution

## Rôle de la glace

Malgré des résultats non concluants selon la méthodologie utilisée pour ce projet, la présence de glace sur le haut et le bas estran n'est pas sans effet sur la dynamique côtière. Les sous-sections suivantes sont réalisées à partir des autres travaux ayant été réalisés sur le site de Longue-Pointe-de-Mingan.

## Influence de la glace sur sur le bas estran

Le pied de glace de bas estran et la glace de mer dans la zone limitrophe à la côte influencent certainement l'évolution des barres sableuses en raison de l'interaction entre la glace, les vagues et les barres. À notre connaissance, l'influence de la glace sur la mobilité et la morphologie des barres dans les zones tempérées froides n'a pas encore fait l'objet d'études détaillées. Corriveau et al. (2018) ont été en mesure de décrire la dynamique du profil de plage et des barres sableuses de Longue-Pointe-de-Mingan durant une saison où il n'y avait pas de glace de bas estran. Les levés topographiques réalisés en hiver devant le pied de glace de haut estran ont permis d'observer « un abaissement et un surcreusement de la surface de la partie inférieure de la plage ainsi que sur le bas estran en raison de la réflexion des vagues contre le pied de glace ». Les auteurs ont pu constater que « lorsqu'un cordon sableux était présent sur la partie supérieure du bas estran, il se déplaçait vers le large probablement en raison des courants de retour générés par la réflexion des vagues contre le pied de glace » et que « les barres sableuses localisées dans la zone prélittorale peu profonde tendent quant à elles à se déplacer vers la côte ». Sachant que la présence/absence, la position et la morphologie de la première barre sableuse influencent les vitesses de rétablissement de la côte (Philipps et al., 2017), on peut conclure que les modifications attendues aux conditions glacielles influencent l'évolution de la ligne de rivage.

### Influence de la glace sur sur le haut estran

Sur le haut estran, les travaux réalisés par Corriveau et al. (2016) ont permis de décrire deux cas types d'évolution du profil de plage sous l'influence du pied de glace de haut estran pour les saisons au cours desquelles il n'y avait pas de pied de glace de bas estran. Les lignes suivantes sont presque intégralement tirées de Corriveau et al., 2016.

Dans un cas, on constate le rehaussement de la plage grâce au dépôt de sédiments à la fin de la saison glacielle (crête de sédiments post-glacielle). Les sédiments projetés par les vagues (en l'absence de pied de glace de bas

estran) sur le pied de glace de haut estran sont conservés dans le pied de glace durant la saison glacielle (effet de piège à sédiments) (figure 242 et figure 243). Ces sédiments sont temporairement retirés du transport sédimentaire longitudinal et transversal. Rappelons au passage que tous les sédiments du haut estran qui sont sous le pied de glace sont, eux aussi, soustraits du transport sédimentaire durant la saison glacielle. Au printemps, la sédimentation induite par la fonte du pied de glace sur place crée une crête de sédiments chaotiques et lâches sur l'estran (figure 245). La figure 246 montre que la sédimentation sur l'estran entre décembre 2013 (profil noir) et juin 2014 (profil rouge) a lieu à l'emplacement du pied de glace (profils bleus et verts). La sédimentation a principalement lieu dans la partie frontale du pied de glace. ce qui concorde avec la photographie prise sur le terrain qui montre que les sédiments s'accumulent sur la partie la plus frontale du pied de glace (figure 243 et figure 244). Les sédiments qui étaient alors retirés du transport sédimentaire sont de nouveau disponibles. La crête de sédiment rehausse localement la surface de la plage. En conséquence, en l'absence de vagues capables d'en mobiliser les sédiments, celle-ci limite la progression de l'eau vers la côte. Par contre, sous des conditions de vagues qui permettent la mobilisation des sédiments, ceux-ci sont redistribués selon les conditions hydrodynamiques, vers le haut ou vers le bas, le long du profil de plage.



Figure 242. Charge sédimentaire visible dans un morceau de glace stratifiée, avril 2014, Longue-Pointe-de-Mingan



Figure 243. Accumulation de sable sur la surface du pied de glace, Longue-Pointe-de-Mingan



Figure 244. Accumulation de sable sur la surface du pied de glace, 5 avril 2008, Longue-Pointe-de-Mingan



Figure 245. Crête de sédiments post-glaciel sur le haut estran à Longue-Pointede-Mingan en mai 2014



Figure 246. Profils initiaux de décembre 2013, de la saison glacielle et post-glacielle avec rehaussement par accumulation de sédiment post-glaciels (crête), km-repère 4,40

Sous d'autres conditions, l'effet morphosédimentaire du pied de glace de haut estran est complètement différent. On observe aux figures 247, 248, 249, 250 et 251 que le profil de plage initial de décembre 2013 (profil noir) ou de son homologue théorique<sup>9</sup> (profil pointillé gris) ne termine pas la saison glacielle avec un rehaussement (crête de sédiment), mais plutôt avec un surcreusement. Cette évolution résulte de l'effet de réflexion des vagues qui frappent sur le front du pied de glace, lequel agit ainsi telle une structure rigide. La réflexion des vagues engendre l'affouillement à la base du pied de glace. Ceci est particulièrement visible sur les profils de mars et d'avril 2014 (figure 249 et figure 250). Lors du levé DGPS de juin 2014, le profil du haut estran avait toujours une morphologie concave (figure 252). Notons que le profil 24, à proximité du km-repère 4,75, est localisé devant la zone de falaises en érosion d'un secteur problématique à proximité de la route 138. Le haut estran plus étroit et la dynamique glacielle devant ces falaises semblent accentuer la sensibilité du secteur à l'érosion verticale et latérale. L'état du profil de mai 2013, soit celui de l'année précédente, présente lui aussi un profil concave (figure 253). Les suivis réalisés en 2015 et 2016 dans le cadre d'« Analyse de la dynamique des foyers d'érosion en bordure de la route 138 sur la Côte-Nord afin d'identifier des solutions d'adaptation pour la route 138 » (Corriveau et al., 2018), ont aussi permis d'observer ce type de dynamique. Ceci laisse présager le caractère saisonnier et non ponctuel des observations de la saison glacielle et post-glacielle de 2013-2014.

Enfin, une évolution intermédiaire a aussi été observée. En effet, le long de certains profils, on observe l'abaissement du profil dans sa portion inférieure en raison de l'effet de structure rigide du pied de glace et, un peu plus haut sur l'estran, le rehaussement du profil par la crête de sédiment post-glacielle (figure 254). On ignore encore si, pour ce genre de situation, les sédiments érodés au front du pied de glace sont plutôt évacués vers le large ou alors projetés sur le pied de glace, et donc contribuant directement au volume de la crête au moment de la fonte du pied de glace. La réponse de la plage (crête, surcreusement ou situation intermédiaire) est vraisemblablement liée à la morphologie initiale de la plage (profil de plage pré-englacement). L'analyse détaillée des profils pourrait permettre de définir les conditions qui favorisent l'une ou l'autre de ces réponses.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> L'analyse de l'ensemble des profils indique qu'il y a fort probablement eu un léger abaissement du profil de décembre avant le début de l'englacement du haut estran.



Figure 247. Profils de décembre 2013 et de janvier 2014 au km-repère 4,75



Figure 248. Profils de décembre 2013 et de janvier 2014 et de février 2014 au km-repère 4,75



Figure 249. Profils de décembre 2013 et de février 2014 et de mars 2014 au km-repère 4,75



Figure 250. Profils de décembre 2013 et de mars 2014 et d'avril 2014 au km-repère 4,75



Figure 251. Profils de décembre 2013 et d'avril 2014 et de mai 2014 au km-repère 4,75



INFLUENCE DE LA REDUCTION DU COUVERT DE GLACE SUR L'EROSION COTIERE EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES DE L'EST DU QUEBEC DANS UN

Figure 252. Profils de décembre 2013 et de mai 2014 et de juin 2014 au km-repère 4,75

20

Flexure

40

Flexure

-1

-2

-3

0

60

Distance (m)

80

100

120



Figure 253. Profils post-glaciel de mai 2013 et mai 2014 présentant une forme concave aux km-repère 4,55 et 4,75



Figure 254. Profils initiaux de décembre 2013, de la saison glacielle et post-glacielle avec rehaussement par accumulation de sédiment post-glaciels (crête) et abaissement sur la partie inférieure du haut estran, km-repère 8,45

# 8. CARACTÉRISTIQUES ENVIRONNEMENTALES INFLUENCANT LA SENSIBILITÉ DE LA GLACE DE HAUT ET DE BAS ESTRAN AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

L'analyse de l'évolution des conditions d'englacement entre le passé récent (1981-2010) et l'horizon 2055 (2041-2070) montre que la sévérité de la diminution de la saison glacielle n'est pas la même pour tous les sites témoins. La baisse en pourcentage de la durée de la saison glacielle sur le haut estran varie entre 19 % à 58 %. Les tableaux suivants présentent l'évolution de la durée de la saison glacielle pour le haut estran et le bas estran en nombre de jour de même qu'en pourcentage relatif (tableaux 50 et 51).

L'analyse de la sensibilité de la saison glacielle sur le haut estran et le bas estran sous l'effet des changements climatiques permet d'identifier un certain nombre de caractéristiques favorables ou non au maintien des conditions d'englacement de l'estran pour l'horizon 2055.

	Durée de la saison glacielle (nombre de jour)			Évolution entre le passé récent et l'horizon 2055	
	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
Chandler	84	35	-49	-58	-0,82
La Martinique	125	59	-67	-53	-1,12
Pointe-aux-Loups	117	56	-61	-52	-1,02
Maria	89	50	-38	-45	-0,64
Rivière-à Claude	101	62	-39	-39	-0,65
Pointe-Verte	108	69	-40	-38	-0,66
Saint-Ulric	117	75	-41	-37	-0,69
Penouille 1-3	120	79	-42	-35	-0,69
Rivière Pentecôte	120	81	-39	-33	-0,65
Longue-pointe-de-mingan B_ouest	99	68	-31	-31	-0,51
Rivière Saint-Jean	103	73	-30	-30	-0,5
Baie Saint-Ludger	132	95	-37	-29	-0,61
Longue-pointe-de-mingan D	120	85	-36	-29	-0,59
Longue-pointe-de-mingan B_est	117	85	-32	-27	-0,54
Pointe-Lebel	147	110	-37	-26	-0,61
Penouille 4-5	165	133	-31	-19	-0,52

# Tableau 50. Évolution de la durée de la saison glacielle sur le haut estran

	Duré (no	ée de la sa glacielle mbre de jo	Évolution entre le passé récent et l'horizon 2055		
	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
Chandler	72	26	-46	-64	-0.77
Longue-pointe-de-mingan D	72	26	-46	-63	-0.78
Longue-pointe-de-mingan B_est	76	28	-48	-61	-0.81
Maria	67	30	-37	-57	-0.61
Pointe-Verte	77	39	-38	-52	-0.64
Riviere Pentecote	91	44	-47	-52	-0.79
Longue-pointe-de-mingan B_ouest	85	41	-44	-51	-0.74
Riviere-à Claude	94	48	-46	-50	-0.77
Pointe-Lebel	94	53	-41	-47	-0.68
Baie Saint-Ludger	98	57	-41	-45	-0.68
Penouille 1-3	122	73	-48	-41	-0.8
Riviere Saint-Jean	103	68	-35	-34	-0.58
Saint-ulric	143	109	-34	-24	-0.56
Penouille 4-5	158	127	-31	-20	-0.51
Pointe-aux-Loups	na	na	na	na	na
La Martinique	na	na	na	na	na

# Tableau 51. Évolution de la durée de la saison glacielle sur le bas estran

# 8.1. Diminution sévère de la durée de la saison glacielle sur le haut estran

## Chandler, Pointe-aux-Loups et La Martinique

Les trois sites qui subissent les diminutions les plus importantes de la durée de la saison glacielle sur le haut estran (nombre de jours et évolution relative en %) sont les sites de Chandler (-49 jours, -58 %), de Pointe-aux-Loups (-61 jours, -52 %) et de La Martinique (-67 jours, -53 %). Les conditions d'englacement au cours du passé récent étaient pourtant diamétralement opposées. Avec une durée moyenne de 84 jours, la saison glacielle de Chandler était la plus courte de tous les sites témoins. Inversement, les durées des saisons glacielles sur le haut estran pour les sites de La Martinique et Pointe-aux-Loups étaient beaucoup plus longues avec des durées moyennes respectives de 125 jours et 117 jours. La forte diminution de l'englacement prévue pour l'horizon 2055 est en partie liée à la position des sites d'étude par rapport à la dynamique de la glace de mer ; ces sites étant localisés à l'écart des zones de formation ou d'accumulation de glace de mer.

La dynamique de la glace de mer pour la période 1981-2010 (Fequet et al., 2010) montre que la production et l'accumulation de glace de mer le long des côtes de la rive sud de la péninsule gaspésienne sont limitées. En effet, durant la semaine du 8 janvier alors que de la glace circule déjà le long des côtes des rives de l'estuaire et du golfe de même que de la baie des Chaleurs, cette zone est encore libre de glace de mer (figure 255). Au cours de la semaine suivante (15 janvier), la concentration de glace demeure faible par rapport aux autres régions (figure 256). Dans le cas de Pointe-aux-Loups, ce n'est en moyenne qu'au cours de la semaine du 22 janvier que la glace de mer apparaît le long des côtes (figure 257). Pour La Martinique, la situation est légèrement différente puisque l'englacement débute plus tôt dans les eaux au sud-est de l'archipel; dès la semaine du 15 janvier plus exactement. Par contre, au moment du déglacement, alors que la glace de mer s'accumule le long des côtes nord-ouest de l'archipel, les eaux côtières du sud-est sont libérées plus hâtivement (semaine du 26 mars) (figure 258). Le début et la fin de la saison glacielle, tant pour le passé récent que pour l'horizon 2055, sur ces sites présente le même décalage (figure 18). L'ensemble de ces résultats et observations indiquent que la glace de haut estran est particulièrement sensible aux changements climatiques sur les littoraux localisés à l'écart des zones de production et/ou d'accumulation de glace de mer.



Figure 255. Médiane de la concentration des glaces 1981-2010 pour la semaine du 8 janvier



Figure 256. Médiane de la concentration des glaces 1981-2010 pour la semaine du 15 janvier


Figure 257. Médiane de la concentration des glaces 1981-2010 pour la semaine du 22 janvier



Figure 258. Médiane de la concentration des glaces 1981-2010 pour la semaine du 26 mars

# 8.2. Diminution sévère de la durée de la saison glacielle sur le bas estran

#### Chandler et Longue-Pointe-de-Mingan

Sur le bas estran, la diminution de la saison glacielle s'avère particulièrement sévère pour les sites de Chandler (-46 jours, -64 %) et de Longue-Pointe-de-Mingan (-44 jours à -48 jours, -51 % à -63 %). Dans les deux cas, les sites sont une fois de plus localisés à l'écart des zones de production et/ou d'accumulation de glace de mer. Le cas de Chandler a été décrit à la section précédente. Quant à Longue-Pointe-de-Mingan, on peut voir sur la carte de la semaine du 22 janvier que la concentration de glace de mer médiane est moindre dans les eaux au nord-ouest de l'île d'Anticosti qu'ailleurs dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (figure 257). Notons par ailleurs que, dans les deux cas, le suivi de la dynamique glacielle à partir des caméras n'a pas permis d'identifier une dynamique propre au pied de glace de bas estran. Au contraire, la glace observée sur le bas estran correspondait davantage à de la glace de mer en mouvement (section 7.5.3 et section 7.14.3).

Alors que c'est aussi la glace de haut estran qui s'avère particulièrement sensible aux changements climatiques à Chandler (-49 jours, -58 %), la glace de haut estran à Longue-Pointe-de-Mingan l'est beaucoup moins (-31 jours à -36 jours, -27 % à -31 %). Pour Longue-Pointe-de-Mingan, l'absence de glace sur le bas estran favorise l'effet d'affouillement au front du pied de glace devant certains segments côtiers, soit possiblement dans les zones où le haut estran est plus étroit est la pente du haut estran plus forte (section 7.14). Alors que la diminution de la saison glacielle sur le haut estran est moins marquée, la sensibilité de l'englacement du bas estran aux changements climatiques impliquera des modifications de la dynamique saisonnière des plages qui devraient s'accentuer. Compte tenu du nombre limité d'années sur lesquelles les relations empiriques ont été développées, il serait nécessaire de poursuivre le suivi et de développer de nouvelles relations empiriques pour améliorer la fiabilité des résultats obtenus. Ainsi, dans le cas de Longue-Pointe-de-Mingan, c'est aussi en partie l'orientation de la côte par rapport aux vents dominants qui accentue la sensibilité de la glace de bas estran aux changements climatiques. En effet, durant les années de suivi, même lors des années froides de 2013-2014 et de 2014-2015, la présence de glace sur le bas estran était généralement ponctuelle (figures 226, 227 et 228); il n'y a pas eu de véritable formation de pied de glace de bas estran (déplacement horizontal limité). Au cours de l'hiver 2017-2018, qui a été relativement froid (moins que 2013-2014 et 2014-2015 en regard de la concentration de glace de

mer), il y a eu formation d'un pied de glace de bas estran (terrain maîtrise Catherine Bruyère, LDGIZC). L'analyse des vents montrerait probablement des conditions distinctes ayant favorisé la formation du pied de glace de bas estran pour cette année de suivi grâce aux conditions de vents.

# 8.3. Diminution modérée de la durée de la saison glacielle sur le haut estran

#### Penouille 4-5

Le site témoin où la diminution de la durée de la saison glacielle sur le haut estran est la moins sévère est Penouille 4-5. On prévoit pour ce site une diminution de la durée de la saison glacielle sur le haut estran de 31 jours ce qui correspond à une diminution de 19 % seulement. La durée de la saison glacielle passe ainsi de 165 jours à 133 jours entre le passé récent et l'horizon 2055. Il s'agit, pour le passé récent comme pour l'horizon 2055, du site où la saison glacielle sur le haut estran est la plus longue.

La stabilité de la glace et la plus faible sensibilité de celle-ci face aux changements climatiques sont en partie attribuables à la localisation du littoral dans un endroit abrité, soit la baie de Gaspé. Cependant, cette caractéristique n'est pas suffisante pour expliquer les résultats puisque la diminution de la durée de la saison glacielle sur le haut estran prévue pour le site de Penouille 1-3 est plus importante. En effet, pour celui-ci on prévoit plutôt une perte de 42 jours sur le haut estran ce qui correspond à une diminution de l'ordre de 35 %. Ce qui distingue les deux sites d'étude est l'orientation de la côte par rapport à l'écoulement de la glace. Le site de Penouille 4-5 est situé à l'ouest de la flèche où le littoral orienté nord-sud fait face au fond de la baie de Gaspé (face à l'ouest) et face à l'écoulement de la glace de mer qui s'effectue dans l'axe de la baie. La glace qui se forme sur l'estran est donc plus stable en plus de s'accumuler contre la rive lors de la période de déglacement de la baie. Durant cette période, la glace y demeure en place plus longtemps qu'ailleurs dans la baie. Par exemple, la figure 259 montre que la glace était toujours en place en date du 28 avril 2014 alors que la baie est déglacée.



Figure 259. Présence tardive de glace sur le bas estran et signe d'affaiblissements de la banquise préalables au déglacement (fusion en surface et fissures) devant Penouille 4-5, 28 avril 2014

#### Pointe-Lebel et Baie-Saint-Ludger

Toutes proportions gardées, la sensibilité de la glace de haut estran pour les sites témoins de la péninsule de Manicouagan est elle aussi assez modérée. Pour Pointe-Lebel, on prévoit que la saison glacielle passe de 147 jours à 110 jours pour une perte totale de 37 jours correspondant à une diminution de l'ordre de 26 %. Pour Baie-Saint-Ludger, on prévoit que la saison glacielle passe de 132 jours à 95 jours pour une perte totale de 37 jours correspondant à une diminution de l'ordre de 29 %.

L'analyse des cartes de la médiane de la concentration de glace de mer de 1981-2010 montre que cette zone est favorable à la production de glace de mer. On observe effectivement sur la figure 260 que l'englacement débute d'abord à proximité de la péninsule de Manicouagan pour les eaux côtières de la Côte-Nord (semaine du 25 décembre). Cette situation est attribuable à la conjoncture entre plusieurs variables environnementales. Néanmoins, la

présence de la large batture (2,5 km) favorise certainement l'englacement hâtif du haut estran pour les sites de la péninsule de Manicouagan. Tel qu'indiqué précédemment, l'exposition du bas estran lors de la marée basse aux températures de l'air est favorable à la formation de glace. Les observations de la dynamique glacielle montrent que le large bas estran est favorable à la formation de nouvelle glace s'accumulant sur le haut estran sous l'effet du battement de la marée. Ainsi, le début de la saison glacielle sur le haut estran est lui aussi assez hâtif (figure 18). En effet, la saison glacielle débute pour le passé récent, le 9 novembre à Pointe-Lebel et le 23 novembre à Baie-Saint-Ludger. Ailleurs sur la Côte-Nord, la saison glacielle débute plus tardivement soit entre le 22 et le 27 décembre. Bref, la morphologie du bas estran sur la péninsule de Manicouagan limite la sensibilité de la glace de haut estran par rapport à ce qui est prévu ailleurs.



Figure 260. Médiane de la concentration des glaces 1981-2010 pour la semaine du 25 décembre



Figure 261. Zoom sur l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent sur la carte de la médiane de la concentration des glaces 1981-2010 pour la semaine du 25 décembre

# 8.4. Diminution modérée de la durée de la saison glacielle sur le bas estran

### Penouille 4-5

Pour les raisons décrites précédemment, la glace de bas estran pour le site de Penouille 4-5 est la moins sensible aux changements climatiques. On prévoit pour ce site une diminution de l'ordre de -31 jours (-20 %) alors qu'ailleurs elle est de -34 jours à -48 jours (24 % à 64 %).

#### Saint-Ulric

Le site de Saint-Ulric est lui aussi caractérisé par une réduction relativement modérée de la durée de la saison glacielle sur le bas estran. On y prévoit, pour l'horizon 2055, une diminution de la durée de la saison glacielle sur le bas estran de 34 jours (-24 %). À la lumière des observations sur la dynamique glacielle, on comprend que la morphologie du bas estran est probablement une des caractéristiques environnementales en cause (section 7.1.3). De plus, l'orientation de la côte face aux vents dominants est elle aussi favorable à la stabilité de la glace.

# 9. CARTOGRAPHIE DES SECTEURS EN BORDURE DES INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES OÙ LES VITESSES D'ÉROSION DES LITTORAUX DEVRAIENT AUGMENTER

L'objectif 4 du projet de recherche impliquait une cartographie des secteurs en bordure des infrastructures routières où les vitesses d'érosion des littoraux devraient augmenter sous l'effet des changements attendus aux conditions d'englacement. Lorsque la quantification a été possible, les résultats présentés jusqu'ici montrent que la variabilité de la réponse de la côte aux modifications conditions glacielles et hydrodynamiques est importante ce qui limite la possibilité de généraliser spatialement les résultats. Cette grande variabilité soutient d'autant plus la nécessité de réaliser des analyses complètes des conditions de vagues et d'englacement à la côte de même que de la dynamique côtière et de l'évolution historique de la côte pour évaluer l'effet potentiel des changements des conditions de vagues et de glace sur la vitesse de déplacement de la côte pour le futur. De plus, le manque de connaissances sur la réponse sédimentaire des différents systèmes côtiers aux conditions d'englacement a presque chaque fois été identifié comme un des inconnus limitant la compréhension de l'évolution de la côte pour le futur. En conséquence, les résultats du projet ne permettent pas d'effectuer une cartographie des secteurs en bordure des infrastructures routières où les vitesses d'érosion des littoraux devraient augmenter en dehors des sites qui ont fait l'objet d'une analyse détaillée.

# **10.CONCLUSIONS PAR OBJECTIF**

#### 10.1. Conclusions objectif 1

Des relations empiriques permettant de reconstituer de manière rétrospective (1981-2010) et prospective (2041-2070) l'état d'englacement des sites d'étude ont été développées et appliquées. En général, ces relations ont été développées sur la base d'observations réalisées au cours d'années « chaudes » et au cours d'années « froides ». Ceci a permis de couvrir un bon nombre de situations possibles et d'obtenir des relations empiriques adéquates pour produire des séries temporelles d'englacement pour le passé récent (plus froid) et l'horizon 2055 (plus chaud) selon trois simulations climatiques différentes.

Pour tous les sites d'étude, on prévoit une diminution de l'englacement pour l'horizon 2055. Sur le haut estran, on prévoit que la saison glacielle débute entre 12 et 23 jours (moyenne de 16 jours) plus tard et prenne fin entre 14 à 46 jours (moyenne de 21 jours) plus tôt. Sur le bas estran, on prévoit que la saison glacielle débute entre 12 et 19 jours plus tard (moyenne de 15 jours) et prenne fin entre 17 et 28 jours (moyenne de 22 jours) plus tôt. Au total, la durée de la saison glacielle sur le haut estran perd entre 30 et 67 jours ce qui équivaut à une diminution de l'ordre de 19 % à 58 % selon les sites d'étude. Sur le bas estran, on prévoit une diminution comprise entre 31 jours et 48 jours, soit entre 20 % et 64 % selon les sites d'étude.

Puisqu'il a été démontré que l'état d'englacement ne peut expliquer à elle seule l'évolution de la côte telle que mesurée annuellement à partir des stations de suivi (Corriveau et al., 2015), les données de vagues produites à partir du modèle WaveWatch III ont été intégrées à l'analyse. Les données de vagues pour les périodes 1981-2010 et 2041-2070 de la simulation BBHI (la plus chaude) ont fait l'objet d'une analyse sommaire. Le nombre d'heures où la hauteur des vagues en direction de la côte dépasse la valeur du 95<sup>e</sup> percentile (calculé sur la période 1981-2010) est à la hausse pour tous les sites d'étude à l'exception de La Martinique aux Îles-de-la-Madeleine (-37 %). Les sites situés sur la péninsule de Manicouagan sur la Côte-Nord (Pointe-Lebel et Baie–Saint-Ludger) de même que sur la rive sud du Saint-Laurent (Saint-Ulric et Rivière-à-Claude) sont ceux pour lesquels la hausse est la plus marquée (116 % à 250 %).

# 10.2. Conclusions objectif 2

Les déplacements négatifs mesurés à la côte à l'aide des stations de suivi (2000-2015) ont été mis en relation avec les conditions hydrodynamiques et d'englacement telles qu'obtenues à partir de la simulation réaliste (2000-2015) et des relations empiriques.

Des relations jugées suffisamment concluantes pour être utilisées pour estimer le changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison de la réduction du couvert de glace et des modifications aux conditions de vagues pour l'horizon 2055 ont été trouvées pour les sites de Saint-Ulric, Rivière-à-Claude, Penouille 1-3, La Martinique et Rivière-Pentecôte. Mise à part Penouille 1-3, les relations trouvées sont fortement dirigées par des valeurs extrêmes. Ceci implique qu'une proportion des déplacements négatifs annuels n'est pas expliquée par les variables considérées (niveau d'eau, vagues et glace).

Ces relations ont permis d'évaluer le nombre d'heures où la glace aurait assuré une protection directe (limitant le contact entre la côte et la mer grâce au rehaussement topographique de la glace) contre les évènements potentiellement érosifs survenus entre 2000-2015. Les résultats montrent que le nombre d'heures de protection a été extrêmement variable d'une année à l'autre en fonction des conditions hydrodynamiques et en fonction des conditions d'englacement. Conséquemment, le ratio de protection varie entre 0 % et 100 % selon les années et les sites. S'il n'y avait pas eu de glace d'estran durant les années de suivi, le déplacement négatif moyen annuel aurait, théoriquement, subi une hausse comprise entre 0 % à 53 % ou d'un recul supplémentaire compris entre 0 m et 0,78 m (Rivière-à-Claude).

## 10.3. Conclusions objectif 3

Sur les sites où les relations entre les déplacements négatifs mesurés à la côte et les conditions hydrodynamiques et d'englacement ont été concluantes (objectif 2), il a été possible d'estimer l'ampleur du changement de la vitesse de déplacement du littoral en raison de la réduction du couvert de glace côtière pour l'horizon 2041-2070. En pourcentage, l'augmentation de la valeur moyenne (30 ans) des déplacements négatifs entre le passé récent (1981-2010) et l'horizon 2055 (2041-2070) varie entre 7 % (Penouille 1-3) et 516 % (Saint-Ulric).

Sur les sites de **Saint-Ulric** (516 %) et de **Rivière-à-Claude** (144 %), qui ont été relativement stables sur l'intervalle historique le plus long (1948-2012;

0,08 m/an et 1948-2009; 0,04 m/an, respectivement), les valeurs de déplacements négatifs trouvées pour l'horizon 2055 apparaissent suffisamment sévères pour entraîner un changement de tendance. Toutes choses étant égales par ailleurs, les modifications des conditions de vagues et de glace à la côte devraient faire en sorte que la tendance pour le futur soit à l'érosion.

Pour le site **de Penouille 1-3**, qui est historiquement stable grâce à une alternance entre des intervalles d'avancées et de reculs (1948-2008; 0,19 m/an), la hausse de 7 % prévue au déplacement moyen négatif annuel n'est pas suffisamment importante pour entraîner une modification de l'évolution du système de Penouille qui, par ailleurs, montre une résilience suivant les évènements d'érosion.

Sur le site de **Rivière Pentecôte**, la côte présente une stabilité relative voire une progradation (1930-2008; 0,13 m/an). Cependant, compte tenu de l'importance de la dynamique sédimentaire pour ce site, on ignore si la vitesse de rétablissement de la côte sera suffisante ou non pour que l'évolution littorale s'inscrive ou non dans la tendance historique (stabilité relative ou en accumulation) pour mitiger l'augmentation de 384 % des valeurs de déplacements négatifs annuels prévue pour l'horizon 2055. Par contre, dans les zones d'influence des cours d'eau de plage, cette augmentation pourrait entraîner des reculs nets à la côte puisque ces cours d'eau limitent les réavancées de la côte subséquemment aux évènements de tempête.

Sur le site de **La Martinique**, l'augmentation de 43 % des valeurs de déplacements négatifs n'apparaît pas suffisante pour modifier la progradation du système mesurée sur l'intervalle historique le plus long (progradation, 1963-2008; 1,42 m/an). Les vitesses de reculs les plus sévères ayant pu être observées historiquement ont souvent été plus importantes que la valeur moyenne des déplacements négatifs prévue pour l'horizon 2055. Toutes choses étant égales par ailleurs, la tendance évolutive du littoral devrait se maintenir (progradation).

Enfin, il n'était pas adéquat de généraliser les résultats du projet à l'échelle de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent pour réaliser une cartographie des secteurs en bordure des infrastructures routières où les vitesses d'érosion des littoraux devraient augmenter. La grande variabilité intersites ayant été trouvée soutient la nécessité de réaliser des analyses complètes des conditions de vagues et d'englacement à la côte de même que de la dynamique côtière et de l'évolution historique de la côte pour évaluer l'effet potentiel des changements des conditions de vagues et de glace sur la vitesse de déplacement de la côte pour le futur.

## 10.4. Conclusions objectif 4

L'analyse de la sensibilité de la glace de haut et de bas estran aux changements climatiques a permis d'identifier certaines caractéristiques environnementales favorisant le maintien de la glace d'estran. Il s'agit de :

- La localisation des sites par rapport aux zones de formation et/ou d'accumulation de glace de mer;
- L'orientation de la côte par rapport au patron d'écoulement de la glace de mer ;
- L'orientation de la côte par rapport aux vents dominants ;
- La morphologie du bas estran.

La morphologie du haut estran est certainement une autre caractéristique influençant la sensibilité de la glace d'estran aux changements climatiques, mais celle-ci n'a pu être évaluée dans le cadre de ce projet. L'analyse de sites d'étude localisés à proximité les uns des autres et soumis à des conditions météorologiques et océaniques similaires doit être considérée. Les sites de Longue-Pointe-de-Mingan auraient pu en partie satisfaire cette condition, mais les relations empiriques et les projections d'état d'englacement y sont moins robustes qu'ailleurs en raison du nombre limité d'années de suivi disponible. De plus, la très forte variabilité de la morphologie du haut et du bas estran complexifierait aussi les conclusions d'une telle analyse sur ce site en particulier.

### 10.5. Conclusions générales

Plusieurs variables environnementales influencent la géomorphologie et l'évolution côtière. Dans les zones libres de glace, les variables principales sont la géologie, le marnage, les vagues et l'évolution du niveau marin relatif. Le réseau présenté à la figure 262 illustre l'influence de ces variables sur l'évolution côtière et sur la géomorphologie qui, elle-même, influence l'évolution côtière. Dans les régions plus froides telles que les nôtres, il est nécessaire d'ajouter à ces variables la glace de mer et la glace de haut et de bas estran (figure 263). D'une part, on peut voir que la glace de mer interagit avec les vagues ; l'interaction entre la glace de mer et les vagues constituent un champ de recherche à part entière (par ex. Williams et al., 2013). En l'absence d'estran, il est aussi possible que la glace de mer influence directement la géomorphologie et l'évolution de la côte. D'autre part, la glace d'estran influence la géomorphologie et l'évolution côtière. Cependant, la géomorphologie influence à son tour les conditions de glace sur l'estran.



Traduit de Shterkhun et al. (2018, modifié de Yates et Le Cozannet, 2012)

Figure 262. Réseau bayésien représentant les variables environnementales influençant l'évolution côtière, zones côtières sans glace



Adapté et traduit de Shterkhun et al. (2018, modifié de Yates et Le Cozannet (2012))



L'objectif principal du projet de recherche était de décrire, comprendre et quantifier l'effet de la réduction de l'état d'englacement des estrans de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent sur la dynamique des côtes (évolution côtière) qui sont principalement sensibles aux effets des agents hydrodynamiques (côtes sablonneuses, falaises de grès).

Dans le cadre de ce projet, l'influence de la glace d'estran sur l'évolution côtière, à travers son rôle de protection, a pu faire l'objet d'analyses (flèche verte à la figure 263). Toutefois, les connaissances sur les relations entre la géomorphologie et la glace sont encore très peu développées, voire presque inexistantes (flèche rouge). Cette limite a été soulevée à maintes reprises dans les conclusions ayant été émises sur les perspectives d'évolution côtière dans un contexte de changements climatiques. En ce sens, les projections d'évolution côtière nécessitent d'être améliorées grâce à l'acquisition de connaissances sur l'impact des conditions d'englacement sur la dérive sédimentaire et les échanges longitudinaux, sur les échanges sédimentaires transversaux, notamment sur les sites où l'on retrouve des réserves sédimentaires sur le bas estran (cordons, barres sableuses) et sur l'évolution des profils de plage et ce, d'autant plus que ces conditions changeront sous l'effet des changements climatiques.

Actuellement, la mise en place de recharges de plage comme méthode alternative de protection côtière est fréquente dans certains pays et est en

émergence au Québec. Au cours des dernières années, la recharge de sédiments des plages a été utilisée comme approche alternative aux structures rigides dans au moins 8 secteurs de l'Est du Québec (Didier et al., 2018). Les méthodes de protection souples s'avèrent des alternatives intéressantes aux structures rigides qui peuvent favoriser l'abaissement des plages (Bernatchez *et al.*, 2011) et accroître les risques de submersion (Bernatchez *et al.*, 2011; Didier *et al.*, 2015). La conception de recharges de plage efficace nécessite une bonne connaissance de la dynamique sédimentaire. Dans ce contexte, il est d'autant plus nécessaire de développer les connaissances sur les relations entre la géomorphologie et la glace d'estran de même que l'évolution de celles-ci sous l'effet des changements climatiques. De manière plus générale, la conception des ouvrages de protection doit tenir compte des changements climatiques et de ses impacts sur les conditions de vagues et de glace d'estran.

# RÉFÉRENCES

- ARÉ, F. E. 1988. Thermal abrasion of sea coasts. Polar Geography and Geology, 12(1), 87-157.
- ARTUSI, R., P. VERDERIO, et E. MARUBINI, 2002. Bravais-Pearson and Spearman correlation coefficients: meaning, test of hypothesis and confidence interval. *Int. J. Biol. Markers*, **17**, 148–151.
- BACKHAUS, J. O., 1985. A three-dimensional model for the simulation of shelf sea dynamics. *Dtsch. Hydrogr. Zeitschrift*, **38**, 165–187.
- BACKHAUS, J. O., et E. Maier-Reimer, 1983. On seasonal circulation patterns in the North Sea. *North Sea Dynamics*, Springer Berlin Heidelberg, 63–84.
- BAMASOUD, A., et M.-L. BYRNE, 2012. The impact of low ice cover on shoreline recession: A case study from Western Point Pelee, Canada. *Geomorphology*, **173-174**, 141–148, doi:10.1016/j.geomorph.2012.06.004. http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X12002759 (Accessed October 23, 2013).
- BARNES, P. W., E. W. KEMPEMA, E. REIMNITZ, M. MCCORMICK, E. C. HAYDEN, et W. S. WEBER, 1993. Beach Profile Modification and Sediment Transport by Ice: An Overlooked Process on Lake Michigan. *J. Coast. Res.*, **9**, 65–86.
- BERNATCHEZ, P., 2003. Évolution littorale holocène et actuelle des complexes deltaïques de Betsiamites et de Manicouagan-Outardes : synthèse, processus, causes et perspectives. Université Laval, 460 pp.
- BERNATCHEZ, P., et J.-M. M. DUBOIS, 2004. Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. *Géographie Phys. Quat.*, 58, 45–71.
- BERNATCHEZ, P., et J.-M. M. DUBOIS, 2008. Seasonal Quantification of Coastal Processes and Cliff Erosion on Fine Sediment Shorelines in a Cold Temperate Climate, North Shore of the St. Lawrence Maritime Estuary, Québec. J. Coast. Res., 24, 169–180, doi:10.2112/04-0419.1. http://www.bioone.org/doi/abs/ 10.2112/04-0419.1 (Accessed October 17, 2013).
- BERNATCHEZ, P., et R. LEBLANC, 2000. Impacts morphosédimentologiques et écologiques du pied de glace sur un littoral sableux : exemple du delta Manic-Outardes, estuaire maritime du Saint-Laurent. *Congrès de l'Association québécoise pour l'étude du Quaternaire*, Montréal (Québec), 22 au 27 août 2000.
- BERNATCHEZ, P., C. FRASER, S. FRIESINGER, Y. JOLIVET, S. DUGAS, et S. DREJZA, 2008. Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques. Laboratoire. Université du Québec à Rimouski, rapport de recherche remis au Consortium Ouranos et au FACC, 256 pp.

- BERNATCHEZ, P., TOUBAL, T., VAN-WIERTS, S., DREJZA, S. et FRIESINGER, S. 2010. Caractérisation géomorphologique et sédimentologique des unités hydrosédimentaires de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups, route 199, Îles-de-la-Madeleine. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport final remis au ministère des Transports du Québec, avril 2010, 177 p.
- BERNATCHEZ, P., FRASER, C., LEFAIVRE, D., et DUGAS, S. 2011. Integrating anthropogenic factors, geomorphological indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards. Ocean & Coastal Management, 54(8), 621-632.
- BERNATCHEZ, P. BOUCHER-BROSSARD, G., et SIGOUIN-CANTIN, M. 2012a. Contribution des archives à l'étude des événements météorologiques et géomorphologiques causant des dommages aux côtes du Québec maritime et analyse des tendances, des fréquences et des temps de retour des conditions météo-marines extrêmes. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, 140 p.
- BERNATCHEZ, P., DREJZA, S. et DUGAS, S. 2012b. Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des îles de la Madeleine. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, juillet 2012, 71 p. et annexes
- BERNATCHEZ, P., FRASER, C., DUGAS, S. et DREJZA, S. 2012c. Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral de la MRC d'Avignon. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, août 2012, 49 p. et annexes.
- BERNATCHEZ, P., S. FRIESINGER, C. DENIS, et Y. JOLIVET, 2012d. Géorisques côtiers, vulnérabilité et adaptation de la communauté de Nutashkuan dans un contexte de changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Conseil tribal Mamuitun et au Ministère des AADNC 219 pp.
- BERNATCHEZ, P., QUINTIN, C., FRASER, C., NEUMEIER, U., JOLIVET, Y., HOUDE-POIRIER, M., HETU, B., GIBEAULT, C., BOUCHER-BROSSARD, G. et MARIE, G. 2013. Dynamique de l'écosystème côtier de la péninsule de Penouille dans un contexte de changements climatiques, Parc national du Canada Forillon : Rapport final. Rapport remis au Parc national du Canada Forillon. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, mai 2013, 410 p.
- BERNATCHEZ, P., G. BOUCHER-BROSSARD, M. CORRIVEAU, et Y. JOLIVET, 2014. Impacts des changements climatiques sur l'érosion des falaises de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent. Université du Québec à Rimouski, Rapport de recherche remis au ministère de la Sécurité publique du Québec et au consortium Ouranos, 166 pp.

BERNATCHEZ P. et S. DREJZA, 2015. Réseau de suivi de l'érosion côtière du

Québec maritime - Guide pour les utilisateurs. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et Chaire de recherche en géoscience côtière. Université du Québec à Rimouski, octobre 2015, 52 p.

- BERNATCHEZ, P., ARSENAULT, E., LAMBERT, A., BISMUTH, E., DIDIER, D., SENNEVILLE, S., DUMONT, D., CAVEEN, J., SÉVIGNY, C., BEAUDRY, J. BANDET, M. 2017. Programme de mesure et de modélisation de la morphodynamique de l'érosion et de la submersion côtière dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (MODESCO), Phase II : rapport final. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, mars 2017, 172 p. + annexe.
- BOUCHARD, J.-D., 1997. Variations saisonnières des profils d'une plage sur l'île Miscou, Nouveau-Brunswick: effet de la glace. Université du Québec à Rimouski, 169 pp.
- BOUCHER-BROSSARD, G. 2012. Rythme et modes de recul des falaises à sommet tourbeux de la Côte-Nord de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, Canada, 168 p. +annexes
- BROWN, E.A., WU, C.H., MICKELSON, D.M et EDIL, T.B. 2005. Factors controlling Rates of bluff recession at two sites on lake Michigan, *Journal of great lake research*, 31 : 306-321
- CANUTO, V. M., Y. HOWARD, A., CHENG, et M. S. DUBOVIKOV, 2001. Ocean turbulence. Part I: One-point closure model-momentum and heat vertical diffusivities. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 1413–1426.
- CARIOLET, J.-M. 2011. Quantification du runup sur une plage macrotidale à partir des conditions morphologiques et hydrodynamiques. *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 1, 95–109.
- CARON, T., 2016. Caractérisation de la dynamique d'embouchure des ruisseaux côtiers et de leur rôle sur la dynamique morphosédimentaire de plages sableuses de la Côte-nord du Saint-Laurent, Québec. Mémoire de maîtrise en géographie, Université du Québec à Rimouski, 228 pages
- CHARLES, E., IDIER, D., DELECLUSE, P., DEQUE, M., et LE COZANNET, G. 2012. Impact du changement climatique sur les vagues et la dérive littorale le long du littoral aquitain. La Houille Blanche, (6), 26-33.
- CORRIVEAU, M., BERNATCHEZ, P., ST-ONGE DROUIN, S. et SENNEVILLE, S., 2015. Influence de la réduction du couvert de glace sur l'érosion côtière en bordure des infrastructures routières de l'Est du Québec dans un contexte de changements climatiques : Rapport méthodologique. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport méthodologique remis au ministère des Transports du Québec, novembre 2015, 156 p.
- CORRIVEAU, M., FRASER, C., CARON, T., BERNATCHEZ, P., BUFFIN-BELANGER, T. VAN-WIERTS, S., 2016. Étude de la dynamique morphosédimentaire des côtes basses sablonneuses en bordure de la route 138 sur la Côte-Nord du Saint-Laurent en contexte de changements climatiques : Rapport final. Projet X016.1. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée

des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère des Transports du Québec, Mars 2016, 421 p. + annexes.

- CROASDALE, K. R., et R. W. MARCELLUS, 1978. Ice and wave action on artificial islands in the Beaufort Sea. *Can. Geotech. J.*, **5**, 98–113.
- CSSA CONSULTANTS LTÉE, 1992. Étude de la dynamique du littoral de la Presqu'île de Penouille-Parc national Forillon. Environnement Canada, Service canadien des parcs, 108 p.
- DAIGNEAULT, M. 2001. Processus d'altération/érosion à l'interface océan/continent/atmosphère: aspects quantitatifs et semi-quantitatifs: exemple des falaises de l'Est du Canada (Gaspésie) (Doctoral dissertation, Saint-Etienne).
- DAVIES, R. A., V. GOLDSMITH, et Y. E. GOLDSMITH, 1976. Ice effects on beach sedimentation, examples from Massachusetts and lake Michigan. *Rev. géographie Montréal*, **30**, 201–206.
- DIDIER, D. 2014. Evaluation de la submersion côtière par l'estimation insitu du wave runup sur les côtes basses du Bas-Saint-Laurent, Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 160 p.
- DIDIER, D., BERNATCHEZ, P., MARION, N., DREJZA, S. 2018. Suivi environnemental de travaux de rechargement de plage dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent et suivi de la re-naturalisation d'une plage comme solution d'adaptation aux aléas côtiers. Rapport intermédiaire 1 : analyse pré- et postdémantèlement de 2016 et du suivi annuel de 2017 de la plage de Cap-des-Rosiers, Parc Forillon. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, mars 2018, 37 p.
- DIONNE, J., 1973. La notion de pied de glace (Icefoot), en particulier dans l'estuaire du Saint-Laurent. *Cah. Geogr. Que.*, **17**, 221–250.
- DIONNE, J.-C., 1976. L'action glacielle dans les schorres du littoral de la baie de James. *Cah. Geogr. Que.*, **20**, 303, doi:10.7202/021323ar. http://id.erudit.org/iderudit/021323ar (Accessed October 23, 2013).
- DIONNE, J., 1993. Sediment load of shore ice and ice rafting potential, upper St. Lawrence estuary, Québec, Canada. *J. Coast. Res.*, **7**, 653–664.
- DREJZA, S., S. FRIESINGER, et P. BERNATCHEZ, 2014. Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques: Caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion, Est du Québec, Volume 1, Projet X008.1. Annexe 4 — Recueil des fiches d'analyse de la dynamique hydrosédimentaire de l'Est du Québec. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, remis au ministère des Transports du Québec, mars 2014, 363 p.
- DUBOIS, J.-M. M. 1977. Nature, stratigraphie et dynamique des formations meubles le long de la route 138 entre Sheldrake et Mingan, moyenne Côte-Nord du Saint-Laurent. Rapport soumis à Roy, Bergeron, Gariépy, Leroux, Dupont et Ass., Montréal, 5 p.

- DUBOIS, J.-M. M. 1979. Environnements quaternaires et évolution post-glaciaire d'une zone côtière en émersion en bordure sud du Bouclier Canadien: La moyenne Côte-Nord du Saint-Laurent, Québec. Thèse de doctorat, University of Ottawa, Canada, 754 p.
- DUBOIS, J.-M. M. et ST-PIERRE, L. 1986. *Carte des matériaux d'emprunt et des zones de risques sur la moyenne Côte-Nord du Saint-Laurent*. Bulletin de recherche no. 92-93, Département de géographie, University of Sherbrooke, 8 p. + cartes.
- FEQUET, D., HACHE, L., MCCOURT, S., LANGLOIS, D., DICAIRE, C., PREMONT, B., et BRADY, M. 2010. Atlas climatique des glace de mer cote est 1981 2010. Environnement Canada: http://iceweb1. cis. ec. gc. ca/30Atlas/page1. xhtml.
- FORBES, D. L., et R. B. TAYLOR, 1994. Ice in the shore zone and the geomorphology of cold coasts. *Prog. Phys. Geogr.*, **18**, 59–89, doi:10.1177/030913339401800104. http://ppg.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/030913339401800104 (Accessed October 23, 2013).
- FORBES, D. L., G. K. MANSON, R. CHAGNON, S. M. SOLOMON, J. J. VAN DER SANDEN, et T. L. LYNDS, 2002. Nearshore ice and climate change in the southern gulf of St. Lawrence. *Ice in the Environment: Proceedings of the 16th IAHR International Symposium on Ice*, Dunedine, New Zealand,2nd–6th December, International Association of Hydraulic Engineering and Research.
- FORBES, D. L., G. S. PARKES, G. K. MANSON, et L. a. KETCH, 2004. Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. *Mar. Geol.*, 210, 169–204, doi:10.1016/j.margeo.2004.05.009.
  http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0025322704001367 (Accessed October 17, 2013).
- GRENIER, A. 1993. Évolution littorale récente et impact des structures artificielles aux Îles de la Madeleine, golfe du Saint-Laurent, Québec. Mémoire de maîtrise, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 275 p.
- GÜNTHER, F., OVERDUIN, P. P., SANDAKOV, a. V., GROSSE, G. et GRIGORIEV, M. N. 2013. Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region. *Biogeosciences*, 10(6), 4297–4318.
- HALL, J. W., MEADOWCROFT, I. C., LEE, E. M. et VAN GELDER, P. H. 2002. Stochastic simulation of episodic soft coastal cliff recession. *Coastal Engineering*, 46 (3), 159–174.
- HUME, J. D., et M. SCHALK, 1976. The effects of ice on the beach and nearshore, point Barrow, arctic Alaska. *Rev. géographie Montréal*, **30**, 105–114.
- JOYCE, J. R. F., 1950. Notes on ice-foot development, Neny Fjord Graham Land, Antarctica. *J. Geol.*, **58**, 646–649.
- LEE, E. M. 2008. Coastal cliff behaviour: Observations on the relationship between beach levels and recession rates. *Geomorphology*, 101(4), 558-571.
- LEE, E., MEADOWCROFT, I., HALL, J. et WALKDEN, M. 2002. Coastal landslide activity: a probabilistic simulation model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61(4), 347–355.

- LESSARD, G. L., et J.-M. M. DUBOIS, 1984. Évolution littorale multitemporelle d'une côte récemment déglacée du nord du golfe du Saint-Laurent. *Rev. géomorphologie Dyn.*, **33**, 81–96.
- LEWIS P.J., MORGAN M.D. 1984. Severe storms of Canada's East coast: a catalogue summary for the period 1957 to 1983. Report n° 84-13, Canadian Cimate Centre, Atmospheric Environment Service, Canadian Climate Program, 322 p.
- LONG, B. 2006. Étude hydrodynamique, sédimentologique et biologique des sites de Maria, Saint-Siméon, Bonaventure, Newport et Cap d'Espoir dans la baie des Chaleurs, Québec, Canada. Ministère desTransports du Québec. Contrat 3100-00-QH02. 121 pages.
- MAHONEY, A., EICKEN, H., SHAPIRO, L., et GRAVES, A. 2006. Defining and locating the seaward landfast ice edge in northern Alaska. In 18th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'05), Potsdam, NY (pp. 991-1001).
- MARIE, G., BERNATCHEZ, P., DUGAS, S., FRASER, C. et DREJZA, S. 2014. Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des MRC de La Mitis et de La Matanie et des municipalités de Cap-Chat et Sainte-Anne-des-Monts. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, juillet 2014, 74 p.
- MANSON, G. K., S. M. SOLOMON, J. J. VAN DER SANDEN, D. L. FORBES, I. PETERSON, S. PRINSENBERG, et T. L. WEBSTER, 2002. Discrimination of nearshore, shoreface, and estuarine ice on the North Shore of Prince Edward Island, Canada, using RADARSAT-1 and C-band polarimetric SAR. 7th International Conference on Remote Sensing in Marine and Coastal Environments, Miami, mai.
- MARSH, W. M., B. D. MARSH, et J. DOZIER, 1973. Formation, Structure and geomorphic influence of Lake Superior icefoots. *Am. J. Sci.*, **273**, 48–64.
- MCCANN, S. B., et R. B. TAYLOR, 1975. Beach freezeup sequence at Radstock Bay, Devon Island, Arctic Canada. *Arct. Alp. Res.*, **7**, 379–386.
- MCCULLOCH, M.M., FORBES, D.L., SHAW, R.W. et CCAF (Climate Change Action Fund) A041 Scientific Team, 2002. Coastal impacts of climatic change and sealevel rise on Prince Edward Island: Synthesis report & supporting documents. Geological Survey of Canada, Dartmouth, Open File 4261, 62 p.
- MOIGN, A., 1976. L'action des glaces flottantes sur le littoral et les fonds marins du Spitsberg central et nord-occidental. *Rev. géographie Montréal*, **30**, 51–64.
- MOIGN, Y., 1972. Étude dynamique d'une plage subarctique : Sept-Îles. Université de Bretagne Occidentale, France, 303 pp.
- MORNEAU, F., M. MICHAUD, F. LECOURS, L. CÔTÉ et D. ROY. 2001. Étude d'impact sur l'environnement : reconstruction d'un mur le long de la route 132 municipalité de Maria, baie de Cascapédia. Gouvernement du Québec, ministère des Transports du Québec, 36 pages + annexes
- NIELSON, N., 1988. Observations of sea ice influence on the littoral sediment exchange, North Zealand, Denmark. *Geogr. Tidsskr.*, **88**, 61–67.

- OWENS, E. H., 1976. The effects of ice on the littoral zone at Richibucto head eastern New Brunswick. *Rev. géographie Montréal*, **30**, 95–104.
- PHILLIPS, M. S., HARLEY, M. D., TURNER, I. L., SPLINTER, K. D., et COX, R. J. 2017. Shoreline recovery on wave-dominated sandy coastlines: the role of sandbar morphodynamics and nearshore wave parameters. *Marine Geology*, 385, 146-159.
- QUINTIN, C., BERNATCHEZ, P., JOLIVET, Y. 2013. Impacts de la tempête du 6 décembre 2010 sur les côtes du Bas-Saint-Laurent et de la baie des Chaleurs. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et Chaire de recherche en géoscience côtière, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, Février 2013, Volume I : 48p. + Volume II : 170 p.
- ROSS, N., 1988. Formation et évolution spatio-temporelle d'une barre de déferlement en milieu micro à méso-tidal dominé par les houles. Université du Québec à Rimouski, 142 pp.
- ROSS, N. et LONG, B. 1989. Évolution morpho-sédimentaire de la barre de déferlement: un exemple dans le golfe du Saint-Laurent, Québec, Géographie physique et quaternaire, 43(3), 377-388
- SALLENGER, Jr. A. H., KRABILL, W., BROCK, J., SWIFT, R., MANIZADE, S. et STOCKDON, H. 2002. Sea-cliff erosion as a function of beach changes and extreme wave runup during the 1997-1998 El Niño, *Marine geology*, 187 : 279-297
- SAUCIER, F. J., F. ROY, et D. GILBERT, 2003. Modeling the formation and circulation processes of water masses and sea ice in the Gulf of St. Lawrence. *J. Geophys. Res.*, **108**, 3269.
- SENNEVILLE, S., ST-ONGE DROUIN, S., DUMONT, D., BIHAN-POUDEC, A.-C., BELEMAALEM, Z., CORRIVEAU, M., BERNATCHEZ, P., BÉLANGER, S., TOLSZCZUK-LECLERC, S. et VILLENEUVE, R. 2014. Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques, ISMER-UQAR, Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec, 2014. pp 384.
- SHTERKHUN, V., Le COZANNET, G., et GARCIN, M. 2018. An Approach to Improve Bayesian Inference in Assessment of Coast Evolution. In C. Pshenichny, P. Diviacco, & D. Mouromtsev (Eds.), Dynamic Knowledge Representation in Scientific Domains (pp. 163-174). Hershey, PA: IGI Global. doi:10.4018/978-1-5225-5261-1.ch008
- STEPHENSON, W. J., et KIRK, R. M. 2000. Development of shore platforms on Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand: Part one: the role of waves. *Geomorphology*, 32(1-2), 21-41.
- STRONACH, J. A., J. O. BACKHAUS, et T. S. MURTY, 1993. An update on the numerical simulation of oceanographic processes in the waters between Vancouver Island and the mainland: the GF8 model. *Oceanogr. Mar. Biol. An Annu. Rev.*, **31**, 1–86.
- SWENSON, M. J., WU, C. H., EDIL, T. B. et MICKELSON, D. M. 2006. Bluff recession rates and wave impact along the wisconsin cooast of lake superior, *Journal of*

great lake research, 32 : 512-530

- TROUDE, J. P., et J. B. SERODES, 1988. Le rôle des glaces dans le régime morphosédimentologique d'un estran de l'estuaire moyen du Saint-Laurent. *Can. J. Civ. Eng.*, **15**, 348–354.
- VAN-WIERTS, S., 2012. Développement et application d'un système mobile de laser terrestre pour quantifier le bilan sédimentaire des plages. Université du Québec à Rimouski, 93 p. pp.
- VAN-WIERTS, S., T. CARON, P. BERNATCHEZ, et T. BUFFIN-BELANGER, 2013. Étude de la dynamique morphosédimentaire des côtes basses sablonneuses en bordure de la route 138 sur la Côte-Nord du Saint-Laurent en contexte de changements climatiques : Rapport méthodologique. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, Rapport méthodologique remis au ministère des Transports du Québec, octobre 2013, 43 p. + annexes pp.
- WILLIAMS, T. D., BENNETTS, L. G., SQUIRE, V. A., DUMONT, D., et BERTINO, L. 2013. Wave-ice interactions in the marginal ice zone. Part 1: Theoretical foundations. Ocean Modelling, 71, 81-91.
- WISEMAN, W. J., E. H. OWENS, et J. KAHN, 1981. Temporal and spatial variability of aice-foot morphology. *Geogr. Ann. Ser. A Phys. Geogr.*, **63**, 69–80.
- YATES, M. L., et LE COZANNET, G. 2012. Brief communication 'Evaluating European Coastal Evolution using Bayesian Networks. Natural Hazards and Earth System Sciences, 12(4), 1173–1177. doi:10.5194/ nhess-12-1173-2012
- ZALESAK, S. T., 1979. Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids. *J. Comput. Phys.*, **31**, 335–362.
- ZUMBERGE, J. H., et WILSON, J. T. 1953. Effect of ice on shre development. Coast. Eng. Proc., 1, 201–205

ANNEXES

ANNEXE A Années d'observation photographiques disponibles pour construire les relations empiriques

Site	Estran	Variable	Années	Années chaudes	Années froides	Années normales	Total
	Bac	Concentration	2012-2015	2	2	0	4
1 Saint-Illric	Das	Dév. vertical	2012-2015	2	2	0	4
1. Gaint-Onic	Hout	Concentration	2012-2015	2	2	0	4
	Tiaut	Dév. vertical	2012-2015	2	2	0	4
2. Pointe-aux-	Haut	Concentration	2009-2015	4	3	1	7
Loups	naut	Dév. vertical	2009-2015	4	3	1	7
3. La	Haut	Concentration	2009-2010,2012-2015	3	3	1	6
Martinique	Tiaut	Dév. vertical	2009-2010,2012-2015	3	3	1	6
	Bas	Concentration	2012-2015	2	2	0	4
4 Pointe-Lebel	Das	Dév. vertical	2010-2015	4	2	0	Logal     Junes       0     4       0     4       0     4       0     4       0     4       1     7       1     7       1     6       1     7       1     6       0     4       0     4       0     6       0     6       0     6       0     5       0     5       0     5       0     4       0     4       0     4       0     4       0     4       0     4       0     4       0     4       0     4       0     4       0     4       0     4       0     4       0     4       0     4       0     4       0     4       0     4       0     4       1     6       1     6       1     6       1     6       1     6       1     6       1     6
4. I OIIIte-Lebel	فبيعال	Concentration	2010-2015	4	2	0	6
	Tiaut	Dév. vertical	2010-2015	4	2	0	6
	Bac	Concentration	2010-2011,2013-2015	3	2	0	5
5. Baie Saint-	DdS	Dév. vertical	2010-2011,2013-2015	3	2	0	5
Ludger	Llout	Concentration	2010-2011,2013-2015	3	2	0	5
	naul	Dév. vertical	2010-2011,2013-2015	3	2	0	5
	Poo	Concentration	2012-2015	2	2	0	4
6 Maria	Das	Dév. vertical	2012-2015	2	2	0	4
O. Maria	Hout	Concentration	2012-2015	2	2	0       4         0       4         0       4         0       4         0       4         0       4         1       7         1       7         1       6         0       6         0       6         0       6         0       6         0       6         0       6         0       6         0       6         0       6         0       6         0       6         0       6         0       6         0       7         0       4         0       4         0       4         0       4         0       4         0       4         0       4         0       4         0       4         0       4         0       4         0       4         0       5         1       6         1       6         0	4
	Tiaut	Dév. vertical	2012-2015	2	2		4
	Bac	Concentration	2012-2015	2	2	0	4
7 Pointe-Verte	Das	Dév. vertical	2012-2015	2	2	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	4
7. Pointe-verte	فبيعال	Concentration	2012-2015	2	2	0	4
	Tiaut	Dév. vertical	2012-2015	2	2	0	4
8. Rivière Saint-Jean	Bac	Concentration	2009-2010,2012-2015	3	3	1	6
	Das	Dév. vertical	2009-2010,2012-2015	3	3	1	6
	Hout	Concentration	2009-2010,2012-2015	3	3	1	6
	Tiaut	Dév. vertical	2009-2010,2012-2015	3	2	1	6
	Bas	Concentration	2011-2015	3	2	0	5
9 Penouille 1-2	Das	Dév. vertical	2011-2015	3	2	0	5
9. Penouille 1-3	Hout	Concentration	2011-2015	3	2	0	5
	riaut	Dév. vertical	2011-2015	3	2	0	5

# TableauA1.Annéesd'observationphotographiquesdisponiblespourconstruire les relations empiriques

Site	Estran	Variable	Années	Années chaudes	Années froides	Années normales	Total
	Bas	Concentration	2011-2014	3	1	0	4
10. Penouille 4-	Duo	Dév. vertical	2011-2014	3	1	0	4
5	Haut	Concentration	2011-2014	3	1	0	4
		Dév. vertical	2011-2014	3	1	0	4
	Bas	Concentration	2012-2015	2	2	0	4
11. Rivière à	Das	Dév. vertical	2012-2015	2	2	0	4
Claude	Hout	Concentration	2012-2015	2	2	0	4
	Πauι	Dév. vertical	2012-2015	2	2	0	4
	Poo	Concentration	2012-2015	2	2	0	4
12 Chandlor	DdS	Dév. vertical	2012-2015	2	2	0	4
12. Chandler	Llout	Concentration	2012-2015	2	2	0	4
	naul	Dév. vertical	2012-2015	2	2	0	4
	Dee	Concentration	2012-2015	2	2	0	4
13. Rivière	DdS	Dév. vertical	2012-2015	2	2	0	4
Pentecôte	Laut	Concentration	2012-2015	2	2	0	4
	Παυι	Dév. vertical	2012-2015	2	2	0	4
	Poo	Concentration	2013-2015	1	2	0	3
14. Longue-	Das	Dév. vertical	2013-2015	1	2	0	3
Mingan B est	Hout	Concentration	2013-2014	1	1	0	2
·····g······	Πauι	Dév. vertical	2013-2014	1	1	0	2
15 Longue- Pointe-de- Mingan B_ouest	Bac	Concentration	2013-2014	1	1	0	2
	Das	Dév. vertical	2013-2014	1	1	0	2
	Laut	Concentration	2013-2014	1	1	0	2
	Πauι	Dév. vertical	2013-2014	1	1	0	2
16. Longue- Pointe-de-		Concentration	2013-2015	1	2	0	3
	Bas	Développement vertical	2013-2015	1	2	0	3
Mingan D	Haut	Concentration	2013-2015	1	2	0	3
	naut	Dév. vertical	2013-2015	1	1 2 0		3

**ANNEXE B** Regroupement des caméras

# Tableau A 2. Regroupement des caméras et comparaison des valeurs de concentration de glace sur le haut estran entre du 1 novembre au 31 mai

Site	Groupe	Coefficient de détermination R <sup>2</sup>	Erreur-type	Caméras exclues en partie ou en totalité
Baie Saint-Ludger	Caméra 1 (6 Est) Caméra 2 (6 Ouest) Caméra 3	Cam 1 – 2 : 0,89 Cam 1 – 3 : 0,80 Cam 2 – 3 : 0,80	Cam 1 – 2 : 8,39 Cam 1 – 3 : 8,06 Cam 2 – 3 : 11,44	Aucune
Pointe-Lebel	Caméra 1 Caméra 2 Caméra Glace (sauf pour concentration de haut estran) <sup>1</sup>	0,79	11,87	Caméra 5
Rivière Pentecôte	Caméra B Caméra C Caméra D Caméra E	Cam B-C : 0,31 Cam B-D : 0,75 Cam B-E :0,58 Cam C-D : 0,72 Cam C-E :0,57 Cam-D-E : 0,87	cam B-C:9,01 cam B-D:11,38 cam B-E: 5,55 cam C-D:6,71 cam C-E: 8,67 cam D-E: 4,19	Caméra A
Rivière Saint-Jean	Caméra 3 Caméra 4 Caméra 5-SANS NOM Caméra 6- GLACE <sup>1</sup> Caméra 7-FALAISE	Cam 3-4 : 0,60 Cam 3-5 : nd² Cam 3-7 : nd² Cam 4-5 : nd² Cam 4-7 : nd² Cam 5-7: nd²	Cam 3-4:17,89 Cam 3-5: nd <sup>2</sup> Cam 3-7 : nd <sup>2</sup> Cam 4-5 : nd <sup>2</sup> Cam 4-7 : nd <sup>2</sup> Cam 5-7 : nd <sup>2</sup>	Caméra 1 Caméra 2
Longue-Pointe-de-Mingan B_est	Longue-Pointe-de-Mingan B_est	Na	Na	Aucune
Longue-Pointe-de-Mingan B_ouest	Longue-Pointe-de-Mingan B_ouest	Na	Na	Aucune
Longue-Pointe-de-Mingan D	D_est D_ouest D_ruisseau	D_est – D_ouest: nd² D_est – D_ruisseau : 0,83 D_ouest – D_ruisseau : nd²	D_est – D_ouest : nd² D_est – D_ruisseau : 6,93 D_ouest – D_ruisseau : nd²	Aucune

Site	Groupe	Coefficient de détermination R <sup>2</sup>	Erreur-type	Caméras exclues en partie ou en totalité
Rivière-à-Claude	Cam_hydro Cam_est Cam_ouest	hydro – est : 0,94 hydro - ouest : nd <sup>3</sup> est - ouest : nd <sup>3</sup>	hydro – est : 9,76 hydro- ouest : nd <sup>3</sup> est- ouest : nd <sup>3</sup>	Aucune
Saint-Ulric	Cam_Est Cam_ouest Cam_glace	0,87	12,26	Aucune
Penouille 1 et 3	Caméra 1 Caméra 3	0,75	14,60	Caméra 2 (vers les falaises)
Penouille 4 et 5	Caméra 4 Caméra 5	0,86	17,42	Aucune
Maria	Caméra_est Caméra_ouest	0,92	5,85	Aucune
Pointe-Verte	Caméra_Pointe-Verte	Na	Na	Aucune
Chandler	Caméra Chandler	Na	Na	Aucune
La Martinique	Caméra_Nord Caméra_Sud Caméra_Large Caméra_Enroch	Nord - Sud : 0,86 Nord - Large : 0,62 Nord - Enroch : nd <sup>2</sup> Sud - Large : 0,75 Sud - Enroch : 0,86 Large - Enroch : nd <sup>2</sup>	Nord - Sud : 9,12 Nord - Large : 9,17 Nord - Enroch: nd <sup>2</sup> Sud - Large : 7,03 Sud - Enroch : 6,36 Large - Enroch : nd <sup>2</sup>	Aucune
Pointe-aux-Loups	Caméra_Nord Caméra_Sud	Nord – Sud : 0,67	Nord – Sud : 20,77	Caméra GLACE

<sup>1</sup>les valeurs 0-500-1000 sont utilisées lorsque la visibilité ou le cadrage ne permettent d'évaluer que partiellement les concentrations ou l'épaisseur de glace. Dans ce cas, seuls les 0 sont inclus dans les séries temporelles à grouper.

<sup>2</sup>Les statistiques ne sont pas disponibles puisque les séries temporelles des caméras ne se superposent pas ou pas suffisamment.

<sup>3</sup> Est et ouest = 24 jours de recouvrement seulement et hydro et ouest = 16 jours de recouvrement seulement.

### ANNEXE C

Coordonnées géographiques retenues pour le choix des cellules du modèle MOR pour extraire les variables environnementales et identifications desdites cellules

Site	Latitude	Longitude	Coordonnée en i	Coordonnée en k
1. Saint-Ulric	48,77	-67,77	20	69
2. Pointe-aux-Loups	47,56	-61,67	106	108
2 La Martinique	47,33	-61,93	108	101
S. La Martinique	47,33	-61,93	108	102
4. Pointe-Lebel	49,09	-68,26	10	68
5. Baie Saint-Ludger	49,07	-68,36	10	68
6. Maria	48,16	-66,01	49	74
7. Pointe-Verte	48,18	-65,97	50	75
8. Rivière Saint-Jean	50,29	-64,36	35	126
9. Penouille 1-3	48,85	-64,43	59	102
10. Penouille 4-5	48,85	-64,43	57	102
11. Rivière-à-Claude	49,22	-65,88	34	94
12. Chandler	48,35	-64,64	62	91
13. Rivière Pentecôte	49,71	-67,172	14	89
14. Longue-Pointe-de-Mingan B_est	50,27	-64,28	36	127
15 Longue-Pointe-de-Mingan B_ouest	50,27	-64,28	36	127
16. Longue-Pointe-de-Mingan D	50,27	-64,28	36	127

#### Tableau A 3. Coordonnées géographiques retenues pour le choix des cellules du modèle MOR pour extraire les variables environnementales et identifications desdites cellules

ANNEXE D Zone de formation « régulière » du pied de glace de haut estran

#### Zone de formation « régulière » sur le haut estran

Sur le bas estran, l'espace de formation du pied de glace correspond toujours à la zone géomorphologique du bas estran. Ainsi, une concentration de glace de 60 % couvre toujours 60 % du bas estran et cette donnée s'intègre donc directement dans la conversion des données de concentration et d'épaisseur de glace en un indice de protection générale. Par contre, sur le haut estran, les indices de protection sont définis en fonction de la proportion de la zone « régulière<sup>10</sup> » de formation du pied de glace étant couvert par la glace.

La zone « régulière » de formation du pied de glace de haut estran se situe généralement dans la zone d'influence des marées et des vagues lors de la phase d'englacement<sup>11</sup>. Les conditions de marnage et les conditions hydrodynamiques et géomorphologiques font en sorte que, par exemple, le pied de glace se forme sur 100 % du haut estran au site de Longue-Pointe-de-Mingan (B\_Est) et sur seulement 30 % du haut estran sur le site Pentecôte. Aussi, en raison de la morphologie du profil de plage et des conditions hydrodynamiques qui prévalent lors de l'englacement, le pourcentage de couverture du pied de glace de haut estran est variable d'une année à l'autre. Le tableau A 4 présente les concentrations maximales observées à l'aide des caméras.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> L'expression « régulière » est ici utilisée par opposition à des conditions de vagues ou de niveau d'eau exceptionnels.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> L'évaluation de la zone de formation du pied de glace est faite à partir des caméras et n'est possiblement pas exactement de la même largeur que celle qu'on aurait mesurée sur le terrain, et ce, en raison de l'angle et de l'effet de perspective des images de caméras.
Site	Caméras	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
	Baie Saint-Ludger Cam 1 et 6 est	Na	Na	100	90	Na	80	80	100
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	50- 100	nd	Na	80	60	100
	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	50	nd	Na	80	60	100
udger	Baie Saint-Ludger Cam 2 et 6 ouest	Na	Na	100	90	Na	70	80	Na
Saint-L	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	70	80	Na	70	80	Na
Baie S	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	100	90	Na	70	60	Na
	Baie Saint-Ludger Cam 3	Na	Na	100	Na	Na	Na	Na	Na
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	50- 100	Na	Na	Na	Na	Na
	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	100	Na	Na	Na	Na	Na
	Pointe-Lebel Cam 1	Na	Na	80	Na	50	80	70	100
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	80	Na	50	70	70	100
-Lebel	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	80	Na	50	70	70	100
Pointe	Pointe-Lebel Cam 2	Na	Na	90	100	Na	80	Na	Na
_	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	90	100	Na	80	Na	Na
	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	90	100	Na	80	Na	Na

 
 Tableau A 4. Concentration de glace sur le haut estran maximum observée et maximum observé au cours du pléniglaciel des années de suivis

Site	Caméras	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
	Pentecôte Cam B	Na	Na	Na	Na	Na	40	10	20
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	Na	40	10	nd
	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	Na	40	10	10
	Pentecôte Cam C	Na	Na	Na	Na	30	20	30	10
fe	Indice obs. hor = 1 ou $0,75$	Na	Na	Na	Na	30	20	30	Nd
entecô	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	30	20	30	10
ď	Pentecôte Cam D	Na	Na	Na	Na	Na	40	20	Na
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	Na	Nd	20	Nd
	Epaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	Na	40	20	Nd
	Pentecôte Cam E	Na	Na	Na	Na	Na	40	20	Na
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	Na	Nd	20	Nd
	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	Na	Nd	20	Nd
	Rivière-Saint-Jean Cam 3	Na	100	Na	Na	Na	Na	Na	Na
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	100	Na	Na	Na	Na	Na	Na
	Épaisseur = 3 et plus	Na	100	Na	Na	Na	Na	Na	Na
	Rivière-Saint-Jean Cam 4	Na	100	Na	Na	Na	Na	Na	Na
t-Jean	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	100	Na	Na	Na	Na	Na	Na
aint	Épaisseur = 3 et plus	Na	100	Na	Na	Na	Na	Na	Na
'ière S	Rivière-Saint-Jean Cam 5	Na	Na	100	Na	Na	Na	Na	Na
Riv	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	100	Na	Na	Na	Na	Na
	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	100	Na	Na	Na	Na	Na
	Rivière-Saint-Jean Cam 7	Na	Na	Na	Na	100	Na	Na	100
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	100	Na	Na	100
	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	100	Na	Na	100

Site	Caméras	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
-Pointe- ngan 3_Est	Longue-Pointe-de- Mingan Cam B_Est	Na	Na	Na	Na	Na	100	100	Na
ongue- de-Mi Cam I	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	Na	100	100	Na
ΓC	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	Na	100	100	Na
-Pointe- ngan _Ouest	Longue-Pointe-de- Mingan Cam B_Ouest	Na	Na	Na	Na	Na	30	30	Na
ongue- de-Mi am B_	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	Na	nd	30	Na
C Lo	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	Na	30	30	Na
	Longue-Pointe-de- Mingan Cam D_Est	Na	Na	Na	Na	Na	nd	40	60
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	Na	nd	40	40- 60
gan	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	Na	nd	40	60
:e-de-Min n D	Longue-Pointe-de- Mingan Cam D_Ouest	Na	Na	Na	Na	Na	30	Na	Na
e Poin Car	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	Na	30	Na	Na
ang	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	Na	30	Na	Na
Lor	Longue-Pointe-de- Mingan Cam D_Ruisseau	Na	Na	Na	Na	Na	Na	40	Na
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	Na	Na	30	Na
	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	Na	Na	30	Na
	Saint-Ulric Cam Est	Na	Na	Na	Na	100	100	80	50
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	nd	100	80	nd
-Ulric	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	90	90- 100	60- 80	50
Saint	Saint-Ulric Cam Ouest	Na	Na	Na	Na	100	100	70	50
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	nd	100	70	nd
	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	40- 80	100	50- 70	40

Site	Caméras	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
	Rivière-à-Claude Cam_Hydro	Na	Na	Na	Na	90	100	60	100
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	90	100	60	100
	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	90	100	60	100
Claude	Rivière-à-Claude Cam_Est	Na	Na	Na	Na	80	Na	Na	Na
ère-à-(	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	80	Na	Na	Na
Rivio	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	80	Na	Na	Na
	Rivière-à-Claude Cam_Ouest	Na	Na	Na	Na	40	Na	Na	Na
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	nd	Na	Na	Na
	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	40	Na	Na	Na
	Penouille Cam 1	Na	Na	Na	70	70	50	70	70
m 1-3	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	70	60	50	70	70
ca	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	60	60	50	70	70
nouille	Penouille Cam 3	Na	Na	80	70	80	70	50	60
Pe	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	80	70	60	40	50	60
	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	80	70	80	50	50	60
	Penouille Cam 4	Na	Na	100	100	100	100	90	Na
4-5	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	100	100	100	100	90	Na
lle ,	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	100	100	100	100	90	Na
Penoui	Penouille Cam 5	Na	Na	100	100	90	70	80	Na
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	100	100	90	70	80	Na
	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	100	100	90	70	80	Na

Site	Caméras	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
	Maria Cam_Est	Na	Na	Na	Na	40	60	50	40
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	40	50	40	40
Iria	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	40	50	40	40
Ma	Maria Cam_Ouest	Na	Na	Na	Na	30	30	30	30
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	30	30	30	30
	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	30	30	30	30
/erte	Pointe-Verte Cam_Pointe-Verte	Na	Na	Na	Na	100	90	100	100
ointe-/	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	100	90	100	100
	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	100	90	100	100
Ŀ	Chandler Cam_Chandler	Na	Na	Na	Na	100	100	50	100
handle	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	100	100	50	100
0	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	60- 100	100	50	100
	La Martinique Cam_Nord	Na	90	50	Na	50	50	30	40
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	90	50	Na	40- 50	30- 50	30	40
	Épaisseur = 3 et plus	Na			Na				
enb	La Martinique Cam_Sud	Na	70	50	Na	50	50	40	Na
Martini	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	60- 70	Nd	Na	50	50	10	Na
La l	Épaisseur = 3 et plus	Na	70	40	Na	40- 50	50	40	Na
	La Martinique Cam_Large	Na	Na	Na	Na	50	40	30	20
	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	Na	Na	Na	50	40	20	nd
	Épaisseur = 3 et plus	Na	Na	Na	Na	50	40	30	nd

Site	Caméras	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
	Pointe-aux-Loups Cam_Nord	Na	100	100	100	50	100	50	100
sdno	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	100	100	100	50	100	50	30- 100
-Lo	Épaisseur = 3 et plus	Na	100	100	100	40	100	50	100
ite-aux	Pointe-aux-Loups Cam_Sud	Na	100	Na	90	30	Na	10	50
Poin	Indice obs. hor = 1 ou 0,75	Na	100	Na	50- 90	30	Na	10	40- 50
	Épaisseur = 3 et plus	Na	100	Na	50- 90	30	Na	10	30- 50

La zone de formation « régulière » du pied de glace de haut estran retenue pour les calculs subséquents correspond à environ la moyenne des concentrations maximales de glace sur le haut estran au moment où l'indice de protection horizontale était de 0,75 et plus et au moment où l'épaisseur de la glace avait atteint au moins 3. Advenant que la zone de formation du pied de glace de haut estran s'élève ou s'abaisse drastiquement pour une année d'observations, cette valeur pourrait ne pas être retenue puisqu'il s'agit généralement de l'effet de la formation de glace sous des conditions de niveaux d'eau et/ou de vagues moins fréquentes, ce qui n'est pas reproduit dans les relations empiriques puisque celles-ci n'incluent pas les niveaux d'eau ni le niveau d'eau total (niveau d'eau + jet de rive/runup). Enfin, la zone de formation « régulière » du pied de glace de haut estran est en tout temps égale ou inférieure à la valeur maximale permise par les relations empiriques (plafond). Ainsi, pour chaque site d'étude, une zone de formation « régulière » du pied de glace de haut estran a été définie (tableau A 5). Au-delà de la zone de formation « régulière » du pied de glace de haut estran se trouve la zone qualifiée ici de « nivale régulière », soit la zone supérieure du haut estran qui demeure généralement complètement libre ou alors est enneigée ou occupée par un pied de glace nivale.

Site	Maximum permis par la relation empirique (plafond)	Zone de formation régulière du pied de glace de haut estran retenue
Baie Saint-Ludger	100	75
Pointe-Lebel	100	80
Pentecôte	30	25
Rivière Saint-Jean	100	100
Longue-Pointe-de-Mingan Cam B_Est	100	100
Longue-Pointe-de-Mingan Cam B_Ouest	30	30
Longue Pointe-de-Mingan Cam D	40	40
Saint-Ulric	100	75
Rivière-à-Claude	100	85
Penouille cam 1-3	65	60
Penouille 4-5	100	90
Maria	40	35
Pointe-Verte	100	100
Chandler	100	70
La Martinique	55	40
Pointe-aux-Loups	100	70

# Tableau A 5. Zone de formation régulière du pied de glace de haut estran retenue et maximum permis par les relations empirique (plafond)

Pour attribuer des indices de protection qui tiennent compte de la variabilité intersite, les classes de concentration sont définies chaque fois selon la division présentée au schéma de la figure A 1. Les quatre premiers intervalles sont définis en divisant la zone « régulière » de formation en quart et le cinquième intervalle correspond à la zone de formation « régulière » du pied de glace nivale. Par exemple, pour une zone « régulière » couvrant 50 % du haut estran, les classes seront les suivantes : 0-12,5, 12,5-25, 25-37,5, 37,5-50 et 50-100. Dans le cas où la zone « régulière » de formation du pied de glace serait de 80 %, les classes seraient de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 et 80-100.



Figure A 1. Division du haut estran pour la conversion des données de concentration et d'épaisseur de glace en indice de protection (sur le schéma, la zone normale de formation du pied de glace de haut estran est de 50 %)

## Précisions sur la localisation de la concentration

Notons que, initialement, les observations (caméras Reconyx) de concentration de glace peuvent être n'importe où sur le haut estran. Par exemple, on pouvait observer une concentration de 20 % sur le haut estran dans la zone 20-60 (0 étant la flexure et 100 le trait de côte/ligne de rivage). Toutefois, ce genre de situations se produit surtout au début ou à la fin de la saison glacielle. Comme les relations empiriques ne reproduisent que la concentration en pourcentage et non la localisation de la glace sur le haut estran, la prémisse de base pour les données prédites par les relations empiriques est que la couverture de glace débute *toujours* à partir de la flexure. Seul le cas de rivière Saint-Jean est différent puisqu'ici, le pied de glace se forme de la base de la falaise vers la flexure et les indices seront donc conçus en conséquence.

**ANNEXE E** Mesures de déplacement du trait de côte/ligne de rivage Les mesures de déplacement du trait de côte/ligne de rivage sont issues des données du réseau de suivi de l'érosion côtière du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'UQAR qui comptait plus de 5000 bornes en 2013 (Bernatchez et Drejza, 2015). Les stations de mesure sont des points fixes qui permettent de réaliser une mesure directe au gallon entre le point fixe et la côte. La différence entre les mesures réalisées à deux dates (T0 et T+1) permet de quantifier le recul ou l'avancée de la côte avec une précision de 0,05 m. Les repères utilisés correspondent soit à des éléments permanents déjà présents (coin de bâtiments, poteaux, arbres...) soit à des piquets de bois d'arpentage installés spécifiquement pour le réseau de suivi. Ils sont mesurés à une fréquence annuelle. La figure A 2 illustre les différents éléments relatifs aux mesures.



Figure A 2. Mesure du déplacement du trait de côte/ligne de rivage

Les mesures de déplacement de la ligne de rivage/trait de côte pour les sites témoins de ce projet sont généralement disponibles à partir de 2000 sur la Côte-Nord et au plus tard, à partir de 2005 pour les autres régions. Comme expliqué plus haut, les mesures de déplacement sont toujours réalisées entre deux dates qu'il importe de connaître. Puisque nous souhaitons expliquer ces mesures, les conditions de niveaux et de vagues ainsi que de l'état d'englacement doivent être considérées à l'intérieur de la période comprise entre les deux dates.

**ANNEXE F** Cartes des points de vagues Les cartes suivantes présentent la localisation des points retenus pour obtenir les données de vagues modélisées. L'équation du runup de Stockdon et al. (2006) exige des données de vagues au large. C'est pourquoi les points choisis sont généralement au-delà de l'isobathe de -80 m. Les points sont aussi choisis dans un axe perpendiculaire à la côte tout en tenant compte de la morphologie du fond et de la côte.



Figure A 3. Localisation du point de vagues pour le site de Saint-Ulric



Figure A 4. Localisation du point de vagues pour le site de Pointe-aux-Loups



Figure A 5. Localisation du point de vagues pour le site de La Martinique



Figure A 6. Localisation des points de vagues pour les sites de Baie-Saint-Ludger et de Pointe-Lebel



Figure A 7. Localisation du point de vagues pour les sites de Maria et de Pointe-Verte



Figure A 8. Localisation du point de vagues pour le site de rivière Saint-Jean et de Longue-Pointe-de-Mingan



Figure A 9. Localisation du point de vagues pour le site de Penouille



Figure A 10. Localisation du point de vagues pour le site de Rivière-à-Claude



Figure A 11. Localisation du point de vagues pour le site de Chandler



Figure A 12. Localisation du point de vagues pour le site de Pentecôte

ANNEXE G Script pour appliquer les relations empiriques sur des sorties de simulation climatiques

```
% Script appelant la fonction relEmp phase2 climat site par site
% Arguments: num -----> numero de site correspondant au Tableau param
           saveName ---> .mat où les résultats des relations sont
8
                            enregistrés
% Auteure: Melany Belzile
% Date: 12 sept 2016
%function [] = relEmp phase2 climat(num, saveName)
clear all
close all
relEmp_phase2_climat(1,'St-Ulric_AHJ_2063.mat');
relEmp_phase2_climat(2,'Pointe-aux-Loups_AHJ_2063.mat');
relEmp phase2 climat(3, 'Martinique AHJ 2063.mat');
relEmp phase2 climat(4, 'Pointe-Lebel AHJ 2063.mat');
relemp_phase2_climat(5,'Baie-St-Ludger_AHJ_2063.mat');
relemp_phase2_climat(6,'Maria_AHJ_2063.mat');
relEmp phase2 climat(7, 'Pointe-Verte AHJ 2063.mat');
relEmp_phase2_climat(8,'Riviere-St-Jean_AHJ_2063.mat');
relEmp_phase2_climat(9,'Penouille13_AHJ_2063.mat');
relEmp_phase2_climat(10, 'Penouille45_AHJ_2063.mat');
relEmp_phase2_climat(11, 'Riviere-a-Claude_AHJ_2063.mat');
relEmp_phase2_climat(12, 'Chandler_AHJ_2063.mat');
relEmp_phase2_climat(13, 'Riviere-Pentecote_AHJ_2063.mat');
relEmp phase2 climat(14, 'Longue-Pointe-MinganBest AHJ 2063.mat');
relEmp_phase2_climat(15,'Longue-Pointe-MinganBouest_AHJ_2063.mat');
relEmp_phase2_climat(16,'Longue-Pointe-MinganD_AHJ_2063.mat');
% Fonction permettant d'appliquer les 60 relations empiriques du projet
% glace phase 2, une station à la fois, sur les simulations climatiques. Cette
% fonction load les series temporelle provenant du modèle et utilise les
% paramètres numériques des relations dans TableauRel nan.csv
% Auteure: Melany Belzile
% Date: 12 sept 2016
function [] = relEmp phase2 climat(num, saveName)
% close all
% clear all
% num=1;
% saveName='St-Ulric AHJ 2063.mat';
cd /sas/projets/projets sims/mtq/gsl/phase2/climat/
% Lecture du Tableau contenant les paramètres numériques des relations
% empiriques
param = dlmread('TableauRel nan.csv',';',[2 6 61 19]);
% Téléchargement des séries temporelles du modèle
load st AIRT deghg climat2063
load st glace climat2063
% Attibution des series temporelles de ce site aux variables
deghg=deghg all(num,:);
deghdg=deghdg all(num,:);
ICON=st_all(:,2,num);
IAHI=st all(:,3,num);
WLEV=st_all(:,4,num);
if num==3
  IAHI2=st all(:,3,17);
  ICON2=st all(:,2,17);
```

```
end
```

```
%% Concentration de BE
disp('conc BE')
% Trouver l'indice du tableau param qui correspond à la concentration de BE
% de ce site
index param=find((param(:,1)*10-num*10)==0.1*10);
% Initialisation
gdr mod BE=nan(1,length(tx));
pente deghg=nan(1,length(tx));
% Determination d'une année de glace a partir du 1er octobre
mtime climatv=datevec(mtime climat);
for y=min(mtime climatv(:,1))+1:max(mtime climatv(:,1))
  disp(y)
  tl=find(mtime climatv(:,1) == y-1 & mtime climatv(:,2) == 10,1,'first');
  t2=find(mtime climatv(:,1) == y & mtime climatv(:,2) == 9,1,'last');
% Prise -----
if isnan(param(index_param,3))
   t3 = find(deghg(t1:t2)>param(index param,2),1,'first');
elseif isnan(param(index param,2))
   t3 = find(ICON(t1:t2)>param(index param,3)/100,1,'first');
end
% Mode dérivée deg h gel -----
% annees chaudes?
if ~isnan(param(index param,4))
       T2=t2-24;
       T1=t1+t3+24;
end
% s'il y a 2 modes de modélisation du pied de glace
if ~isnan(param(index_param,6))
t6 = find(deghg(t1:t2)<param(index param, 6), 1, 'last');</pre>
T2=t1+t6-24;
T1=t1+t3+24;
end
if ~isnan(param(index param, 5))
for i=T1:T2
       pente deghg(i) = ((deghg(i+24) - deghg(i-24)) / (tx(i+24) - tx(i-24)));
       if pente_deghg(i)>(param(index_param,10)/param(index_param,5))
           pente deghg(i) = (param(index param, 10) / param(index param, 5));
       end
       gdr_mod_BE(i)=pente_deghg(i)*param(index_param,5);
end
end
% Mode glace de mer-----
% annees froides?
if ~isnan(param(index_param,4))
   if (max(deghg(t1:t2)))>(param(index param,4))
       T1=t1+t3;
   end
end
% s'il y a 2 modes de modélisation du pied de glace
if ~isnan(param(index param, 6))
   t5 = find(deghg(t1:t2) > param(index param, 6), 1, 'first');
   T1=t1+t5;
else
   T1=t1+t3;
end
```

```
if (num==2 && (max(deghg(t1:t2)))>(param(index_param,4)))
   for i=T1:t2
   gdr mod BE(i)=ICON(i)*100*param(index param,8);
   if gdr_mod_BE(i)>param(index_param,10)
          gdr mod BE(i)=param(index param,10);
   end
   end
elseif (num==2 && (max(deghg(t1:t2)))<(param(index param,4)))</pre>
elseif (num== 8 && (max(deghg(t1:t2)))<(param(index param,4)))</pre>
elseif (num== 9 && (max(deghg(t1:t2)))<(param(index param,4)))</pre>
   for i=T1:t2
    gdr mod BE(i)=ICON(i)*100*param(index param,9);
   if gdr mod BE(i)>param(index param,10)
          gdr_mod_BE(i)=param(index_param,10);
       end
   end
else
for i=T1:t2
   if (max(deghg(t1:t2)))<(param(index param,4))</pre>
       gdr_mod_BE(i)=ICON(i)*100*param(index_param,9);
    elseif num==10 %****
       gdr_mod_BE(i)=param(index_param,9);
    elseif num==3
       gdr mod BE(i)=ICON2(i)*100*param(index param,8);
    else
       gdr mod BE(i)=ICON(i)*100*param(index param,8);
    end
       if gdr mod BE(i)>param(index param,10)
          gdr_mod_BE(i)=param(index_param,10);
       end
end
end
% Fonte -----
                                -----
if isnan(param(index param, 11))
   t4 = find(deghdg(t1:t2) > param(index param,12) & mtime climatv(t1:t2,2)' <
6,1,'first');
elseif isnan(param(index param, 12))
   t4= find(ICON(t1:t2)>param(index param,11)/100,1,'last');
end
for i=t1+t4:t2
  gdr mod BE(i)=0;
end
% mettre 0 ou ya des NaNs en été -----
for i=t1:t2
     if isnan(gdr_mod_BE(i))
         gdr mod BE(i)=0;
     end
end
end
% passer une moyenne mobile ------
nb tstep = param(index param,14)/2;
if param(index param, 13) == 2
   gdr mod temp=gdr mod BE;
    for ii = nb_tstep+1:length(tx)-nb_tstep
     if (deghg(ii)>=param(index param, 6))
        gdr mod BE(ii) = nanmean(gdr mod temp(ii-nb tstep:ii+nb tstep));
     end
    end
```

```
elseif (isnan(param(index param, 13)) && ~isnan(param(index param, 14)))
   gdr mod temp=gdr mod BE;
   for ii = nb tstep+1:length(tx)-nb tstep
        gdr mod BE(ii) = nanmean(gdr_mod_temp(ii-nb_tstep:ii+nb_tstep));
    end
end
% moyenne quotidienne -----
% vecteur temps quotidien
k=1;
for i=1:24:length(tx)-23
 t quoti(k) = mean(tx(i:i+23));
 k=k+1;
end
% vecteur concentration de pied de glace moyen et niveau d'eau max quotidien
mean_conc_BE=nan(1,length(t_quoti));
wlev=nan(1,length(t quoti));
k=1;
for i=1:24:length(tx)-23
 mean conc BE(k)=mean(gdr mod BE(i:i+23));
  t quoti(k) = mean(tx(i:i+23));
 wlev(k) = max(WLEV(i:i+23));
 k=k+1:
end
\% amener les valeurs près de 0 à 0
for i=1:length(mean conc BE)
   if mean conc BE(i)<1
       mean conc BE(i)=0;
    end
end
% %figure -----
% figure
2
% title('Concentration de glace BE','fontsize',16,'FontName','times')
% ylabel('Fraction (%)','fontsize',16,'FontName','times')
% set(gca,'fontsize',12,'FontName','times')
% plot(t quoti,mean conc BE,'c')
% set(gca,'ylim',[-1 105])
% datetick('x','yyyy')
% grid on
 %% Epaisseur de BE
disp('epaiss BE')
% Trouver l'indice du tableau param qui correspond à l'épaisseur de BE
% de ce site
index param=find((param(:,1)*10-num*10)==0.2*10);
% Initialisation
egdr mod BE=nan(1,length(tx));
pente deghg=nan(1,length(tx));
% Determination d'une année de glace a partir du 1er octobre
mtime climatv=datevec(tx);
for y=min(mtime climatv(:,1))+1:max(mtime climatv(:,1))
    disp(y)
  t1=find(mtime_climatv(:,1) == y-1 & mtime_climatv(:,2) == 10,1,'first');
  t2=find(mtime climatv(:,1) == y & mtime climatv(:,2) == 9,1,'last');
```

if isempty(t1)

```
t1=1;
  end
  if isempty(t2)
     t2=length(tx);
  end
% Prise -----
if isnan(param(index param,3))
   t3 = find(deghg(t1:t2)>param(index_param,2),1,'first');
elseif isnan(param(index param,2))
   t3 = find(IAHI(t1:t2)>param(index param, 3), 1, 'first');
end
% Mode dérivée deg h gel ------
% annees chaudes?
if ~isnan(param(index param, 4))
    if (max(deghg(t1:t2)))<(param(index param,4))</pre>
       T2=t2-24;
       T1=t1+t3+24;
     end
end
% s'il y a 2 modes de modélisation du pied de glace
if ~isnan(param(index_param,6))
t6 = find(deghg(t1:t2)<param(index param, 6), 1, 'last');</pre>
T_{2=+1++6-24}:
T1=t1+t3+24;
end
if ~isnan(param(index_param,7))
T2=t2-24;
T1=t1+t3+24;
end
if (~isnan(param(index_param,5)) && ((max(deghg(t1:t2)))<(param(index_param,4))</pre>
|| ~isnan(param(index param,6)) || ~isnan(param(index param,7))))
for i=T1:T2
       pente deghg(i) = ((deghg(i+24) - deghg(i-24)) / (tx(i+24) - tx(i-24)));
       if pente deghg(i)>(param(index param, 10)/param(index param, 5))
           pente_deghg(i) = (param(index_param, 10) / param(index_param, 5));
       end
       egdr mod BE(i)=pente deghg(i)*param(index param,5);
end
end
% Mode glace de mer-----
% annees froides?
if ~isnan(param(index param, 4))
    if (max(deghg(t1:t2)))>(param(index_param,4))
       T1=t1+t3;
    end
end
% s'il y a 2 modes de modélisation du pied de glace
if ~isnan(param(index param, 6))
    t5 = find(deghg(t1:t2) > param(index_param, 6), 1, 'first');
    T1=t1+t5;
else
    T1=t1+t3;
end
if ((num== 2 || num== 9 ) && (max(deghg(t1:t2)))<(param(index param,4)))
   for i=T1:t2
       egdr mod BE(i)=IAHI(i)*param(index_param,9);
```

```
if egdr mod BE(i)>param(index param,10)
          egdr mod BE(i)=param(index param,10);
   end
  end
elseif (num== 8 && (max(deghg(t1:t2)))<(param(index_param,4)))</pre>
elseif num~=10
for i=T1:t2
   if (max(deghg(t1:t2)))<(param(index param, 4))</pre>
       egdr mod BE(i)=IAHI(i)*param(index param,9);
    else
       egdr_mod_BE(i)=IAHI(i)*param(index_param,8);
   end
   if egdr mod BE(i)>param(index param,10)
          egdr mod BE(i)=param(index_param,10);
   end
end
end
if num==10
   t9 = find(IAHI(t1:t2)>param(index param,7),1,'first');
for i=t.1+t.9:t.2
       egdr mod BE(i) = egdr mod BE(t1+t9);
end
end
% Fonte-----
if isnan(param(index param, 11))
   t4 = find(deghdg(t1:t2) > param(index param,12) & mtime climatv(t1:t2,2)' <
6,1,'first');
elseif (isnan(param(index param, 12)) && num~=3)
   t4= find(IAHI(t1:t2)>param(index param,11),1,'last');
% utilisation d'une autre cellule pour la Martinique
elseif (isnan(param(index param, 12)) && num==3)
   t4= find(IAHI2(t1:t2)>param(index_param,11),1,'last');
end
for i=t1+t4:t2
  egdr_mod BE(i)=0;
end
% mettre 0 ou ya des NaNs en été -----
for i=t.1:t.2
       if isnan(egdr mod BE(i))
          egdr mod BE(i)=0;
       end
end
end
% passer une moyenne mobile -----
nb tstep = param(index param,14)/2;
if param(index param, 13) == 2
   gdr mod temp=egdr mod BE;
    for ii = nb tstep+1:length(tx)-nb tstep
     if (deghg(ii)>=param(index param, 6))
        egdr_mod_BE(ii) = nanmean(gdr_mod_temp(ii-nb_tstep:ii+nb_tstep));
     end
   end
elseif (isnan(param(index param,13)) && ~isnan(param(index param,14)))
  gdr mod temp=egdr mod BE;
   for ii = nb_tstep+1:length(tx)-nb_tstep
        egdr mod BE(ii) = nanmean(gdr mod temp(ii-nb tstep:ii+nb tstep));
    end
```

```
end
% save('Epais_BE.mat','egdr_mod_BE')
% moyenne quotidienne -----
% vecteur d'épaisseur de pied de glace quotidien moyen
mean epai BE=nan(1,length(t quoti));
k=1;
for i=1:24:length(tx)-23
 mean epai BE(k)=mean(egdr mod BE(i:i+23));
 k=k+1;
end
\% amener les valeurs près de 0 à 0
for i=1:length(mean epai BE)
   if mean_epai_BE(i)<0.05
      mean_epai_BE(i)=0;
   end
end
% %figure -
                     _____
% figure
% title('Epaisseur de glace BE','fontsize',16,'FontName','times')
% ylabel('Indice de developpement vertical','fontsize',16,'FontName','times')
% set(gca,'fontsize',12,'FontName','times')
% plot(t quoti,mean epai BE,'c')
% set(gca,'ylim',[-1 6])
% datetick('x','yyyy')
% grid on
 %% Concentration de HE
 % Les HE des sites des Iles de la Madeleine (2 et 3) ont été calculé avec le BE
 if (num ~=2 && num~=3)
disp('conc HE')
% Trouver l'indice du tableau param qui correspond à la concentration de HE
% de ce site
index_param=find((param(:,1)*10-num*10)==0.3*10);
% Initialisation
gdr mod HE=nan(1,length(tx));
pente deghg=nan(1,length(tx));
% Determination d'une année de glace à partir du 1er octobre
mtime climatv=datevec(tx);
for y=min(mtime climatv(:,1))+1:max(mtime climatv(:,1))
   disp(y)
 t1=find(mtime climatv(:,1) == y-1 & mtime climatv(:,2) == 10,1,'first');
 t2=find(mtime climatv(:,1) == y & mtime climatv(:,2) == 9,1,'last');
 if isempty(t1)
     t1=1;
 end
 if isempty(t2)
     t2=length(tx);
 end
% Prise -----
if isnan(param(index param,3))
   t3 = find(deghg(t1:t2)>param(index_param, 2), 1, 'first');
elseif isnan(param(index param,2))
   t3 = find(ICON(t1:t2)>param(index param, 3)/100, 1, 'first');
end
% Mode dérivée deg h gel ------
```

```
if ~isnan(param(index param, 5))
T_{2=+2-24}:
T1=t1+t3+24;
for i=T1:T2
       pente deghg(i) = ((deghg(i+24)-deghg(i-24))/(tx(i+24)-tx(i-24)));
       if pente deghg(i)>(param(index param, 10)/param(index param, 5))
          pente_deghg(i) = (param(index_param, 10) / param(index_param, 5));
       end
       gdr mod HE(i)=pente deghg(i)*param(index param, 5);
end
% Mode glace de mer-----
elseif ~isnan(param(index_param,8))
T2=t2;
T1=t1+t3;
for i=T1:T2
      gdr mod HE(i)=ICON(i)*100*param(index param, 8);
end
end
% passer une moyenne mobile ------
nb tstep = param(index param, 14) /2;
  gdr_mod_temp=gdr_mod_HE;
   for ii = t1+nb tstep:t2-nb tstep
       gdr mod HE(ii) = nanmean(gdr mod temp(ii-nb tstep:ii+nb tstep));
   end
  if ~isnan(param(index param,8))
       if gdr mod HE(i)>param(index param,10)
         gdr mod HE(i)=param(index param,10);
       end
  end
% Plateau -----
t6 = find(egdr_mod_BE(t1:t2)>param(index_param,7),1,'first');
for i=t1+t6:t2
       gdr_mod_HE(i) = gdr_mod_HE(t1+t6);
end
% Fonte-----
if isnan(param(index_param,11))
     t4 = find(deghdg(t1:t2) > param(index param,12) & mtime climatv(t1:t2,2)'
< 6,1,'first');
elseif isnan(param(index param, 12))
   t4= find(ICON(t1:t2)>param(index_param,11)/100,1,'last');
end
for i=t1+t4:t2
  gdr_mod_HE(i)=0;
end
% mettre 0 ou ya des NaNs en été -----
for i=t1:t2
      if isnan(gdr mod HE(i))
          gdr_mod_HE(i)=0;
       end
end
end
```

```
% moyenne quotidienne -----
% vecteur concentration de pied de glace quotidien moyen
mean_conc_HE=nan(1,length(t_quoti));
k=1:
for i=1:24:length(tx)-23
 mean conc HE(k) = mean(gdr mod HE(i:i+23));
 k=k+1;
end
% amener les valeurs près de 0 à 0
for i=1:length(mean_conc_HE)
   if mean conc HE(i)<1
       mean_conc_HE(i)=0;
   end
end
% %figure -----
% figure
% title('Concentration de glace HE','fontsize',16,'FontName','times')
% ylabel('Fraction (%)','fontsize',16,'FontName','times')
% set(gca,'fontsize',12,'FontName','times')
% plot(t_quoti,mean_conc_HE,'c')
% set(gca,'ylim',[-1 105])
% datetick('x','yyyy')
% arid on
%% Epaisseur de HE
disp('epaiss_HE')
% Trouver l'indice du tableau param qui correspond à l'épaisseur de HE
% de ce site
index param=find((param(:,1)*10-num*10)==0.4*10);
%Initialisation
egdr mod HE=nan(1,length(tx));
pente deghg=nan(1,length(tx));
% Determination d'une année de glace à partir du 1er octobre
mtime climatv=datevec(tx);
for y=min(mtime climatv(:,1))+1:max(mtime climatv(:,1))
disp(y)
  t1=find(mtime_climatv(:,1) == y-1 & mtime_climatv(:,2) == 10,1,'first');
  t2=find(mtime climatv(:,1) == y & mtime climatv(:,2) == 9,1,'last');
 if isempty(t1)
     t1=1;
 end
 if isempty(t2)
     t2=length(tx);
 end
% Prise -----
if isnan(param(index param,3))
   t3 = find(deghg(t1:t2)>param(index param,2),1,'first');
elseif isnan(param(index param,2))
   t3 = find(IAHI(t1:t2)>param(index param,3),1,'first');
end
% Mode dérivée deq h gel -----
T2=t2-24;
T1=t1+t3+24;
for i=T1:T2
       pente deghq(i) = ((deghq(i+24)-deghq(i-24))/(tx(i+24)-tx(i-24)));
       if pente deghg(i)>(param(index param,10)/param(index param,5))
```

```
pente_deghg(i) = (param(index_param, 10) / param(index_param, 5));
      end
      egdr_mod_HE(i)=pente_deghg(i)*param(index_param,5);
end
% passer une moyenne mobile -----
nb tstep = param(index param,14)/2;
  gdr mod temp=egdr mod HE;
   for ii = t1+nb tstep:t2-nb tstep
       egdr_mod_HE(ii) = nanmean(gdr_mod_temp(ii-nb_tstep:ii+nb_tstep));
   end
% Plateau -----
t6 = find(egdr_mod_BE(t1:t2)>param(index_param,7),1,'first');
for i=t1+t6:t2
      egdr mod HE(i) = egdr mod HE(t1+t6);
end
% Fonte-----
if isnan(param(index param, 11))
   t4 = find(deghdg(t1:t2) > param(index_param,12) & mtime_climatv(t1:t2,2)' <
6,1,'first');
elseif isnan(param(index param, 12))
  t4= find(IAHI(t1:t2)>param(index_param,11),1,'last');
end
for i=t1+t4:t2
 egdr_mod_HE(i)=0;
end
% mettre 0 ou ya des NaNs en été -----
for i=t1:t2
      if isnan(eqdr mod HE(i))
         egdr_mod_HE(i)=0;
      end
end
end
% moyenne quotidienne -----
% vecteur d'épaisseur de pied de glace quotidien moyen
mean_epai_HE=nan(1,length(t_quoti));
k=1;
for i=1:24:length(tx)-23
 mean_epai_HE(k) = mean(egdr_mod_HE(i:i+23));
 k=k+1;
end
% amener les valeurs près de 0 à 0
for i=1:length(mean epai HE)
   if mean epai HE(i)<0.05
      mean_epai_HE(i)=0;
   end
end
% %figure -----
% figure
% title('Epaisseur de glace HE', 'fontsize',16, 'FontName', 'times')
% ylabel('Indice de developpement vertical','fontsize',16,'FontName','times')
```

ANNEXE H Tableau des coefficients de détermination (R<sup>2</sup>) des observations et des résultats des relations empiriques Le coefficient de détermination subit généralement de légères modifications selon que l'on compare les données d'observation par caméras aux résultats des relations empiriques obtenues avec la simulation témoin initiale (MOR-GEM initiale) ou avec la simulation témoin modifiée (MOR-GEM modifié). Sauf exception, le R<sup>2</sup> varie généralement de moins de 1 point (positivement ou négativement) (tableau A 6).

Ainsi, le R<sup>2</sup> comparé avec la simulation témoin modifiée s'est amélioré pour la concentration (+2,50) et l'épaisseur (+5,29) de glace sur le bas estran pour le site de Rivière Pentecôte (13) de même que pour la concentration (+2,09) et l'épaisseur (+2,26) de glace sur le bas estran sur site de Longue-Pointe-de-Mingan D (16).

Par contre, le R<sup>2</sup> a perdu 6,99 points, passant de 65,40 à 58,41 pour la concentration de glace sur le haut estran sur le site de Rivière Saint-Jean (8). Une validation visuelle montre que les résultats de la relation empirique obtenus avec la simulation témoin modifiée semblent pourtant meilleurs pour les années où les observations sont complètes. La diminution du R<sup>2</sup> semble attribuable à la moins bonne corrélation au cours d'une année où les observations sont partielles. En ce sens, aucune modification à l'équation de la relation empirique n'a été effectuée. Dans le cas du site de Longue-Pointe-de-Mingan B\_ouest, le R<sup>2</sup> passe de 79,86 à 66,29 (-13,57) pour la concentration de glace sur le haut estran. Plus spécifiquement, la saison de glace tirée de la relation empirique obtenue avec la simulation témoin modifiée finit plus tard que les observations. Ici, comme les données d'observations ne couvrent que deux saisons et que celles-ci sont ponctuellement manquantes, il est hasardeux de modifier l'équation initiale de la relation empirique. Celle-ci n'a donc pas fait l'objet d'une modification.

Aussi, le coefficient de détermination est passé de 64,59 à 60,46 (-4,13) pour la concentration et de 72,88 à 68,70 (-4,18) pour l'épaisseur de glace sur le bas estran au site de Penouille (9). Sur le site de Maria (6), le R<sup>2</sup> pour l'épaisseur de glace sur le haut estran diminue de 3,08 points. Dans les deux cas, il a été tenté d'ajuster l'équation de la relation empirique pour ne pas réduire le R<sup>2</sup>, mais ces efforts se sont avérés vains. Une nouvelle équation aurait dû être développée pour tenter de maintenir le R<sup>2</sup>. Toutefois, le développement d'une nouvelle équation n'aurait pas garanti que le R<sup>2</sup> soit meilleur ou équivalent au R<sup>2</sup> initial.

num station	conc_BE old	conc_BE new2	conc_BE diff	epai_BE old	epai_BE new2	epai_BE diff	conc_HE old	conc_HE new2	conc_HE diff	epai_HE old	epai_HE new2	epai_HE diff
1	87,38	87,46	0,08	83,08	82,08	-0,99	82,14	82,91	0,77	86,19	85,80	-0,39
2	Na	Na	Na	Na	Na	Na	64,09	63,14	-0,95	84,29	82,84	-1,45
3	Na	Na	Na	Na	Na	Na	58,57	58,25	-0,32	90,83	90,66	-0,17
4	40,76	40,00	-0,76	37,14	37,48	0,34	84,46	84,21	-0,24	81,86	81,84	-0,02
5	33,83	33,21	-0,61	33,71	33,39	-0,32	83,95	83,99	0,05	86,47	86,38	-0,09
6	34,62	35,55	0,93	28,30	28,36	0,07	90,67	89,86	-0,81	86,89	83,81	-3,08
7	69,55	70,29	0,74	50,38	49,98	-0,40	88,14	89,48	1,34	83,63	84,58	0,95
8	34,89	35,42	0,54	40,21	42,03	1,82	65,40	58,41	-6,99	74,33	74,20	-0,13
9	64,59	60,46	-4,13	72,88	68,70	-4,18	84,59	84,32	-0,26	88,93	88,91	-0,02
10	91,20	91,20	0,00	90,65	89,73	-0,92	86,75	86,75	0,00	87,63	87,37	-0,26
11	65,76	66,23	0,46	69,41	69,54	0,13	81,34	81,34	0,00	89,98	89,92	-0,06
12	41,06	40,88	-0,17	40,24	38,39	-1,85	74,26	74,32	0,06	82,47	82,61	0,14
13	37,44	39,94	2,50	24,62	29,91	5,29	63,14	63,55	0,41	75,11	75,14	0,04
14	35,94	36,23	0,29	29,14	29,82	0,68	86,54	87,63	1,09	87,85	88,12	0,27
15	37,35	37,78	0,43	23,88	25,58	1,70	79,86	66,29	-13,57	84,49	84,45	-0,03
16	37,85	39,94	2,09	33,96	36,22	2,26	82,92	82,65	-0,27	90,37	90,39	0,01

Tableau A 6. Comparaison des R<sup>2</sup> obtenus selon la simulation témoin utilisé
**ANNEXE I** Conditions d'englacement pour le passé récent et l'horizon 2055 Cette annexe est un complément à la section 5. L'évolution des conditions d'englacement y est décrite pour chacun des sites et pour chacune des simulations climatiques. Pour chacun des sites, on compte quatre tableaux et une figure.

- Le premier tableau de chacun des sites d'étude présente l'évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le haut et le bas estran (date de début et date de fin)
- Le deuxième tableau de chacun des sites d'étude présente l'évolution de l'état d'englacement sur le haut estran grâce au
  - nombre de jours de la durée de la saison glacielle;
  - le nombre de jours où l'état d'englacement correspondait à la catégorie « complet »;
  - le nombre de jours où l'état d'englacement correspondait à la catégorie « incomplet »;
  - le nombre de jours où l'état d'englacement correspondait à la catégorie « présence de glace ».
- Le troisième tableau présente la même chose que le deuxième tableau, mais pour le bas estran.
- Le quatrième tableau présente l'évolution de l'état d'englacement grâce au nombre de jours où la glace d'estran (haut estran + bas estran) est suffisamment développée pour assurer la protection de la côte contre les agents hydrodynamiques.
- La figure illustre l'évolution de la concentration et du développement vertical de la glace sur le haut et le bas estran pour la simulation BBHI (la plus chaude).

# Saint-Ulric

### Passé récent

Au cours de l'intervalle 1981-2010, les résultats des simulations pour le site de Saint-Ulric indiquent que la saison glacielle débutait le 10 décembre sur le haut estran et le 7 décembre sur le bas estran (tableau A 7). Les dates de fins moyennes simulées sont le 12 mars (haut estran) et le 11 avril (bas estran). Selon les simulations et l'application des relations empiriques, la saison glacielle telle que reproduite pour le passé récent durait en moyenne 117 jours sur le haut estran et 143 jours sur le bas estran (tableau A 8 et A 9). Toujours selon les simulations, les entités glacielles de haut et de bas estran étaient suffisamment développées pour limiter le contact entre les agents hydrodynamiques et la côte durant 107 jours en moyenne (tableau A 10).

### Horizon 2055

Les résultats des simulations pour l'intervalle 2041-2070 indiquent que le début de la saison glacielle, tant sur le haut estran que sur le bas estran, aura un retard de 15 jours par rapport au passé récent et que la fin de la saison se produira avec une avance de 19 jours sur le bas estran et de 25 jours sur le haut estran (tableau A 7). Ainsi, la saison glacielle passe de 117 jours à 75 jours sur le haut estran et de 143 jours à 109 jours sur le bas estran (tableau A 8 et A 9). Le pied de glace de haut estran ne sera complet que pendant 77 jours sur le haut estran et que pendant 81 jours sur le bas estran. C'est aussi une réduction du nombre de jours où la glace assure une protection complète de la côte contre l'érosion qui découle de la diminution de la saison glacielle en passant de 107 jours à 62 jours, ce qui représente une diminution de 43 % de la durée de protection par la glace (-44 jours) (tableau A 10).



#### Tableau A 7. Évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le site de Saint-Ulric

	Нац	ut estra	n		Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ର <b>ଚ</b>	200				AEV bTq	120	75	-45	-38	-0,75
de jou <b>laciel</b>	150				AHJ	128	104	-24	-19	-0,4
nbre c son g	100				BBHI	102	47	-55	-54	-0,92
Non Sais	0	0 2010	2040	2070	Moy. 3 sim.	117	75	-41	-37	-0,69
ទ	200				AEV bTq	96	40	-56	-58	-0,93
de jou ingl, olet »	150				AHJ	87	43	-44	-50	-0,73
nbre ( État e com	50				BBHI	48	10	-38	-79	-0,64
Nor *	0 198	0 2010	2040	2070	Moy. 3 sim.	77	31	-46	-62	-0,77
s «	200				AEV bTq	0,23	0,50	0,27	117	0,00
de jou <b>ngl,</b> i <b>plet</b> ⇒	150				AHJ	0,17	0,27	0,10	59	0,00
nbre o État e ncom	50				BBHI	0,47	0,57	0,10	21	0,00
Non ×	0	0 2010	2040	2070	Moy. 3 sim.	0,29	0,45	0	66	0,00
S	200				AEV bTq	25	35	10	41	0,17
le jou ngl, nce »	150				AHJ	41	61	20	48	0,33
nbre c État el orésel	100				BBHI	54	37	-17	-31	-0,28
No No No N	0	0 2010	2040	2070	Moy. 3 sim.	40	44	NM	NM	NM

 Tableau A 8. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le haut estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Saint-Ulric

\*NM (non moyenné) : Les moyennes n'ont pas été calculées lorsque les tendances des différences simulations n'allaient pas toutes dans les mêmes directions (évolutions positives et négatives).

	Ba	is estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
rs <b>e</b>	200		AEV bTq	139	105	-33	-24	-0,55
le jou <b>laciel</b>	150		AHJ	154	130	-23	-15	-0,39
abre c son gl	100		BBHI	137	92	-45	-33	-0,75
Non Sais	0	80 2010 2040 2070	Moy, 3 sim,	143	109	-34	-24	-0,56
ร	200		AEV bTq	82	40	-42	-52	-0,71
le jou <b>ngl,</b> olet »	150		AHJ	89	63	-26	-29	-0,43
nbre c État e comp	100		BBHI	71	11	-60	-85	-1,01
Nor _ *	0 198	80 2010 2040 2070	Moy, 3 sim,	81	38	-43	-55	-0,72
rs *	200		AEV bTq	1,60	1,27	-0,33	-21	-0,01
de jou <b>ngl,</b> i <b>plet</b> ⇒	150		AHJ	1,87	1,80	-0,07	-4	<0,00
∩bre o État e ncom	100		BBHI	1,43	0,40	-1,03	-72	-0,02
Non * i	0	80 2010 2040 2070	Moy, 3 sim,	1,63	1,16	-0,48	-32	-0,01
S	200	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	AEV bTq	55	64	9	17	0,15
de jou ngl, nce »	150		AHJ	62	64	2	4	0,04
nbre ( État e prése	100		BBHI	64	79	15	24	0,26
Nor     *	0		Moy, 3 sim,	60	69	9	15	0,15

 Tableau A 9. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le bas

 estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Saint-Ulric

# Tableau A 10. Évolution de la protection de la côte grâce au développement verticale du pied de glace de haut estran et du développement de la glace sur le bas estran sur le site de Saint-Ulric

Protectio développ le haut es si	on de la côte, grâce au pement de la glace sur stran (verticalement) et ur le bas estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
rrs côte	200	AEV bTq	107	69	-39	-36	-0,65
de jou h à la ( é » ou plet »	150	AHJ	116	88	-28	-24	-0,46
ectior éctior ééleve	50	BBHI	98	31	-67	-68	-1,11
prot	0	Moy. 3 sim.	107	62	-44	-43	-0,74



oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



# Rivière-à-Claude

#### Passé récent

Sur le site de Rivière-à-Claude, les simulations indiquent que la saison glacielle durait 101 jours sur le haut estran et 94 sur le bas estran au cours du passé récent (tableau A 12 et tableau A 13). La saison glacielle débutait en moyenne le 25 décembre sur le haut estran et tout juste après sur le bas estran, soit le 28 décembre (tableau A 11). La saison prenait fin en moyenne le 1<sup>er</sup> avril sur le bas estran et le 5 avril sur le haut estran. La glace combinée du haut estran et du bas estran offrait alors une protection de 105 jours (tableau A 14).

#### Horizon 2055

Pour l'intervalle 2041-2070, les résultats montrent que la saison glacielle devrait débuter avec 17 jours de retard tant pour le bas estran que pour le haut estran et prendre fin avec 21 jours d'avance sur le bas estran et 17 jours d'avance sur le haut estran (tableau A 11). Ce faisant, la durée de la saison glacielle s'établit alors à 62 jours et 48 jours respectivement (tableau A 12 et tableau A 13). La protection offerte par la glace contre les agents hydrodynamiques et l'érosion qu'ils peuvent provoquer sur la terrasse de plage diminue de 46 jours pour s'établir à 58 jours de protection (tableau A 14).



#### Tableau A 11. Évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le site de Rivière-à-Claude

	Haut estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ର <b>ଚ</b>	200	AEV bTq	97	57	-40	-41	-0,66
le jou <b>aciel</b>	150	AHJ	107	79	-28	-27	-0,47
abre d son gl	100	BBHI	99	49	-50	-50	-0,83
Nom Sais	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	101	62	-39	-39	-0,65
S	200	AEV bTq	80	26	-54	-67	-0,9
de jou ingl, olet »	150	AHJ	63	43	-21	-33	-0,35
nbre o État e comp	50	BBHI	52	13	-39	-76	-0,66
Nor 	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	65	27	-38	-59	-0,64
SI 🔹	200	AEV bTq	7,50	8,67	1,17	16	0,02
łe jou <b>ngl,</b> i <b>plet</b> ,	150	AHJ	6,03	8,40	2,37	39	0,04
nbre o État e ncom	100	BBHI	4,67	2,60	-2,07	-44	-0,03
Nor Nor	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	6,07	6,56	NM	NM	NM
ស	200	AEV bTq	9	22	13	153	0,22
de jou ingl, nce »	150	AHJ	37	27	-10	-27	-0,17
nbre c État e orése	50	BBHI	42	34	-8	-19	-0,14
Non Non Non	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	29	28	NM	NM	NM

Tableau A 12. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le haut estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Rivière-à-Claude

\*NM (non moyenné) : Les moyennes n'ont pas été calculées lorsque les tendances des différentes simulations n'allaient pas toutes dans les mêmes directions (évolutions positives et négatives).

	Ва	as estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ര <b>ല</b>	200	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	AEV bTq	93	44	-49	-53	-0,82
de jou <b>laciel</b>	150		AHJ	101	69	-32	-32	-0,54
nbre c son g	100 50		BBHI	86	30	-56	-65	-0,94
Non Sais	0	80 2010 2040 2070	Moy, 3 sim,	94	48	-46	-50	-0,77
S	200		AEV bTq	33	5	-29	-86	-0,48
te jou <b>ngl,</b> blet »	150		AHJ	29	13	-15	-54	-0,26
nbre o État e comp	100	2000 march 1	BBHI	42	6	-37	-87	-0,61
Non *	0 19	2010 2040 2070	Moy, 3 sim,	35	8	-27	-76	-0,45
SI ¢	200		AEV bTq	0,00	0,00	0,00	#DIV/0 !	0
łe jou <b>ngl,</b> i <b>plet</b> ⇒	150		AHJ	0,00	0,00	0,00	#DIV/0 !	0
nbre c État e ncom	100 50		BBHI	0,00	0,00	0,00	#DIV/0 !	0
Nor Nor	0		Moy, 3 sim,	0,00	0,00	0,00	#DIV/0 !	0,00
SI Ó	200		AEV bTq	58	37	-21	-36	-0,35
de jou ingl,	150		AHJ	71	54	-16	-23	-0,27
mbre ( État ∈ prése	50		BBHI	43	23	-20	-46	-0,33
Nor *	0 19	80 2010 2040 2070	Moy, 3 sim,	57	38	-19	-35	-0,32

 Tableau A 13. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le bas estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Rivière-à-Claude

# Tableau A 14. Évolution de la protection de la côte grâce au développement verticale du pied de glace de haut estran et du développement de la glace sur le bas estran sur le site de Rivière-à-Claude

Protectio développ le haut es su	n de la côte, grâce au ement de la glace sur tran (verticalement) et r le bas estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ırs côte	200	AEV bTq	110	61	-49	-44	-0,81
de jou n à la ( é » ou iplet »	150	AHJ	110	79	-31	-28	-0,51
ectior éctior ééleve	50	BBHI	94	35	-60	-63	-1
prot.	0 1980 2010 2040 2070	Moy, 3 sim,	105	58	-46	-45	-0,77







oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep





oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



# Penouille 1-3

## Passé récent

Au cours de l'intervalle 1981-2010, les résultats des simulations pour le site de Penouille 1-3 indiquent que la saison glacielle débutait en moyenne le 22 décembre sur le haut estran et le 31 décembre sur le bas estran (tableau A 15). La saison glacielle prenait fin le 2 mai sur le bas estran et le 22 avril sur le haut estran. Les données simulées pour le passé récent sont cohérentes avec ce qu'indiquent les travaux de CSSA Consultants Ltée (1992) où les auteurs indiquent que la période glacielle s'étend généralement de la fin décembre à la fin avril. La durée simulée de la durée de la saison glacielle pour le passé récent est en moyenne de 120 jours sur le haut estran et de 122 jours sur le bas estran (tableau A 16 et A 17). Au total, la glace de haut estran et de bas estran offrait une protection complète de la côte contre les agents hydrodynamiques durant en moyenne 112 jours (tableau A 18).

### Horizon 2055

Pour le haut estran, les données simulées pour l'horizon 2055 prévoient une diminution de la durée de la saison glacielle avec un début plus tardif de 17 jours et plus hâtif de 24 jours sur le haut estran (tableau A 15). Le début moyen de la saison glacielle est prévu pour le 8 janvier et la fin, pour le 29 mars (tableau A 15). Il en résulte une diminution totale de 42 jours de la saison glacielle (tableau A 16). Sur le bas estran, les simulations prévoient un retard du début de la saison glacielle de 19 jours, débutant alors le 18 janvier (tableau A 15). Quant à la fin de la saison, elle y sera plus hâtive de 28 jours et prendra fin le 4 avril. La protection offerte par la glace de haut estran et de bas estran passe de 112 jours à 54 jours (tableau A 18). Avec 58 jours de perte de protection, c'est plus de 50 % moins de protection qui est attendue pour ce site.

	-	– Haut estran, passé récent							
	-=	-Haut estran, horizon 2055							
	<b>→</b> - <b>•</b>	– Bas estran, passé récent - Bas estran, horizon 2055	11-Nov 26-Nov 11-Dec	26-Dec	25-Jan 9-Feb	24-Feb	10-Apr 25-Apr 10-May		
	O'muchati ang		DÉBUT				FIN		
	Simulationo								
	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Tx (j/an)	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Tx (j/an)
IJ	AEV bTq	Passé récent 26 déc.	Horizon 2055 14 janv.	<b>Delta</b> 19	<b>Tx (j/an)</b> 0,32	Passé récent 26 avr.	Horizon 2055 2 avr.	Delta -24	<b>Tx (j/an)</b> -0,40
estran	AEV bTq AHJ	Passé récent 26 déc. 10 déc.	Horizon 2055 14 janv. 22 déc.	<b>Delta</b> 19 12	<b>Tx (j/an)</b> 0,32 0,24	Passé récent 26 avr. 17 avr.	Horizon 2055 2 avr. 29 mars	<b>Delta</b> -24 -19	<b>Tx (j/an)</b> -0,40 -0,34
aut estran	AEV bTq AHJ BBHI	Passé récent 26 déc. 10 déc. 30 déc.	Horizon 2055           14 janv.           22 déc.           18 janv.	<b>Delta</b> 19 12 19	<b>Tx (j/an)</b> 0,32 0,24 0,35	Passé récent 26 avr. 17 avr. 23 avr.	Horizon 2055           2 avr.           29 mars           25 mars	<b>Delta</b> -24 -19 -29	<b>Tx (j/an)</b> -0,40 -0,34 -0,49
Haut estran	AEV bTq AHJ BBHI Moy. 3 sim.	Passé récent           26 déc.           10 déc.           30 déc.           22 déc.	Horizon 2055           14 janv.           22 déc.           18 janv.           8 janv.	<b>Delta</b> 19 12 19 <b>17</b>	<b>Tx (j/an)</b> 0,32 0,24 0,35 0,30	Passé récent           26 avr.           17 avr.           23 avr.           22 avr.	Horizon 2055           2 avr.           29 mars           25 mars           29 mars	Delta -24 -19 -29 -24	Tx (j/an)           -0,40           -0,34           -0,49           -0,41
n Haut estran	AEV bTq AHJ BBHI Moy. 3 sim. AEV bTq	Passé récent           26 déc.           10 déc.           30 déc.           22 déc.           4 janv.	Horizon 2055           14 janv.           22 déc.           18 janv.           8 janv.           22 janv.	Delta           19           12           19           17           18	Tx (j/an)           0,32           0,24           0,35           0,30           0,31	Passé récent           26 avr.           17 avr.           23 avr.           22 avr.           8 mai	Horizon 2055           2 avr.           29 mars           25 mars           29 mars           5 avr.	Delta           -24           -19           -29           -24	Tx (j/an)           -0,40           -0,34           -0,49           -0,41           -0,52
sstran Haut estran	AEV bTq AHJ BBHI Moy. 3 sim. AEV bTq AHJ	Passé récent           26 déc.           10 déc.           30 déc.           22 déc.           4 janv.           21 déc.	Horizon 2055           14 janv.           22 déc.           18 janv.           22 janv.           1 janv.	Delta 19 12 19 19 17 18 12 12 19 17 18 12 12 12 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	Tx (j/an)         0,32         0,24         0,35         0,30         0,31         0,21	Passé récent           26 avr.           17 avr.           23 avr.           22 avr.           8 mai           2 mai	Horizon 2055           2 avr.           29 mars           25 mars           29 mars           10 avr.	Delta -24 -19 -29 -24 -33 -22	Tx (j/an)           -0,40           -0,34           -0,49           -0,41           -0,52           -0,41
as estran Haut estran	AEV bTq AHJ BBHI Moy. 3 sim. AEV bTq AHJ BBHI	Passé récent           26 déc.           10 déc.           30 déc.           22 déc.           4 janv.           21 déc.           5 janv.	Horizon 2055 14 janv. 22 déc. 18 janv. 8 janv. 22 janv. 1 janv. 1 févr.	Delta 19 12 19 19 17 18 12 27	Tx (j/an)           0,32           0,24           0,35           0,30           0,31           0,21           0,46	Passé récent           26 avr.           17 avr.           23 avr.           22 avr.           8 mai           2 mai           26 avr.	Horizon 2055           2 avr.           29 mars           25 mars           29 mars           10 avr.           27 mars	Delta           -24           -19           -29           -24           -33           -22           -30	Tx (j/an)           -0,40           -0,34           -0,49           -0,41           -0,52           -0,41

### Tableau A 15. Évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le site de Penouille 13

	Haut estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ର <b>ଚ</b>	200	AEV bTq	120	77	-43	-36	-0,72
le jou <b>laciel</b>	150	AHJ	127	95	-32	-25	-0,53
bre d on gl	100	BBHI	113	64	-50	-44	-0,83
Non Sais	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	120	79	-42	-35	-0,69
S	200	AEV bTq	49	15	-34	-69	-0,57
de jou ingl, olet »	150	AHJ	44	27	-17	-39	-0,29
nbre o État e comp	50	BBHI	12	3	-9	-76	-0,15
Nor *	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	35	15	-20	-61	-0,34
LIS Q	200	AEV bTq	0,27	0,27	0,00	0	0,00
te jou <b>ngl,</b> plet ,	150	AHJ	0,30	0,43	0,13	43	0,00
∩bre c État e ncom	100	BBHI	0,33	0,13	-0,20	-61	0,00
Non ×	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0,30	0,28	NM	NM	NM
S	200	AEV bTq	70	61	-9	-13	-0,15
te jou ngl, nce »	150	AHJ	83	68	-15	-18	-0,25
nbre c État e orései		BBHI	101	61	-41	-40	-0,68
Non Non Non	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	85	63	-22	-24	-0,36

Tableau A 16. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le haut estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Penouille 1-3

\*NM (non moyenné) : Les moyennes n'ont pas été calculées lorsque les tendances des différences simulations n'allaient pas toutes dans les mêmes directions (évolutions positives et négatives).

	Bas estran		Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ა <b>მ</b>	200		AEV bTq	123	72	-51	-42	-0,85
le jou <b>laciel</b>	150		AHJ	132	98	-34	-26	-0,56
bre d on gl	100		BBHI	111	50	-60	-55	-1,00
Non Sais	0	40 2070	Moy. 3 sim.	122	73	-48	-41	-0,80
S	200		AEV bTq	68	1	-67	-99	-1,12
te jou <b>ngl,</b> olet »	150		AHJ	75	20	-55	-73	-0,91
nbre c État e comp	50		BBHI	15	2	-14	-88	-0,23
Nor «	0 1980 2010 204	40 2070	Moy. 3 sim.	53	7	-45	-87	-0,75
s é	200		AEV bTq	1,33	0,20	-1,13	-85	-0,02
le jou <b>ngl,</b> plet ,	150		AHJ	1,63	0,13	-1,50	-92	-0,03
ibre c État e ncom	100 ·		BBHI	0,80	0,00	-0,80	-100	-0,01
Non * E	0 1980 2010 204	40 2070	Moy. 3 sim.	1,25	0,11	-1,00	-92	-0,02
δ	200		AEV bTq	53	68	14	27	0,24
le jou ngl, nce »	150		AHJ	53	73	21	40	0,35
nbre d État el orésel	100		BBHI	92	48	-45	-48	-0,74
Non A *	0 1980 2010 204	40 2070	Moy. 3 sim.	66	63	NM	NM	NM

Tableau A 17. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le bas estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Penouille 1-3

\*NM (non moyenné) : Les moyennes n'ont pas été calculées lorsque les tendances des différences simulations n'allaient pas toutes dans les mêmes directions (évolutions positives et négatives).

Tableau A 18. Évolution de la protection de la côte grâce au développement verticale du pied de glace de haut estran et du développement de la glace sur le bas estran sur le site de Penouille 1-3

Protectio développ le haut es su	n de la côte, grâce au ement de la glace sur tran (verticalement) et r le bas estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ırs côte	200	AEV bTq	120	61	-59	-49	-0,98
de jou n à la e é » ou iplet »	150	AHJ	127	81	-46	-36	-0,77
ectior éctior ééleve	50	BBHI	89	20	-69	-78	-1,15
prot	0	Moy. 3 sim.	112	54	-58	-54	-0,97









oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



## Penouille 4-5

#### Passé récent

Au cours du passé récent, la saison glacielle débutait dès le 27 novembre sur le haut estran et une semaine plus tard (30 novembre) sur le bas estran (tableau A 19). La saison prenait fin assez tardivement, soit le 7 mai sur le bas estran et le 10 mai sur le haut estran. Pendant la saison d'une durée de 165 jours sur le haut estran et de 158 jours sur le bas estran, la glace assurait une protection durant presque la totalité de la saison, soit durant 161 jours (effet combiné de la protection par le pied de glace de haut estran et de bas estran) (tableau A 20, A 21 et A 22).

#### Horizon 2055

Les simulations prévoient, pour l'horizon 2055, un début de saison plus tardif de 2 semaines et une fin plus hâtive de 17 jours et ce, tant sur le haut estran que le bas estran (tableau A 19). De ce fait, la saison glacielle passerait de 165 jours à 134 jours sur le haut estran et de 158 à 127 sur le bas estran (tableau A 20 et A 21). La glace assurera alors 128 jours de protection contre les agents hydrodynamiques et contre l'érosion qu'ils peuvent occasionner lorsqu'ils entrent en contact avec la terrasse de plage sur le site (tableau A 22).

	+	-Haut estran, passé récent	-						
	-•	-Haut estran, horizon 2055							
	-+	- Bas estran, passé récent					•		
	-•	-Bas estran, horizon 2055	11-Nov 26-Nov 11-Dec	26-Dec 10-Jan	25-Jan 9-Feb	24-Feb 11-Mar 26-Mar	10-Apr 25-Apr 10-May		
	Simulations		DÉBUT				FIN		
	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Tx (j/an)	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Tx (j/an)
n	AEV bTq	30 nov.	18 déc.	18	0,30	14 mai	28 avr.	-16	-0,27
estre	AHJ	14 nov.	21 nov.	7	0,13	11 mai	30 avr.	-11	-0,19
aut e	BBHI	6 déc.	23 déc.	16	0,29	6 mai	12 avr.	-24	-0,40
Ĩ	Moy. 3 sim.	27 nov.	10 déc.	14	0,24	10 mai	23 avr.	-17	-0,28
c	AEV bTq	3 déc.	21 déc.	18	0,30	12 mai	27 avr.	-14	-0,24
stra	AHJ	17 nov.	24 nov.	7	0,13	8 mai	27 avr.	-12	-0,20
as e	BBHI	10 déc.	26 déc.	16	0,28	1 mai	7 avr.	-24	-0,41
В	Moy. 3 sim.	30 nov.	14 déc.	14	0,24	7 mai	20 avr.	-17	-0,28

## Tableau A 19. Évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le site de Penouille 45

	На	ut estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
rs او	200		AEV bTq	165	130	-35	-21	-0,58
de jou <b>Iaciel</b>	150		AHJ	178	160	-18	-10	-0,3
nbre ( <b>son g</b>	50		BBHI	151	110	-41	-27	-0,68
Nor Sai:	0 19	80 2010 2040 2070_	Moy. 3 sim.	165	133	-31	-19	-0,52
IS	200		AEV bTq	127	93	-34	-27	-0,57
de jou engl, plet »	150		AHJ	114	111	-3	-2	-0,04
mbre ( État € com	50		BBHI	104	66	-38	-36	-0,63
Nor *	0 19	80 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	115	90	-25	-22	-0,41
s *	200		AEV bTq	0	0	0	na	na
de jou ingl, iplet	150		AHJ	0	0	0	na	na
nbre o État e ncom	50		BBHI	0	0	0	na	na
Nor Nor	0 19	80 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0	0	0	na	na
s	200	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	AEV bTq	37	35	-2	-5	-0,03
de jou <b>engl,</b>	150		AHJ	63	48	-15	-24	-0,25
mbre ∣ État ∈ prés€	50		BBHI	46	42	-3	-7	-0,05
Noi Noi	0 19	80 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	49	42	-7	-12	-0,11

 Tableau A 20. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le haut estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Penouille 4-5

	Ba	as estr	an		Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
റ ല	200				AEV bTq	159	126	-33	-21	-0,55
de jou <b>laciel</b>	150				AHJ	172	153	-19	-11	-0,31
nbre o son g	100				BBHI	142	101	-41	-29	-0,68
Nor <b>Sai</b> s	0	80 201	0 2040	2070	Moy. 3 sim.	158	127	-31	-20	-0,51
S	200				AEV bTq	80	69	-11	-14	-0,18
de jou engl, plet »	150				AHJ	129	108	-20	-16	-0,34
mbre ( État e com	50				BBHI	68	48	-20	-30	-0,34
« Nor	0 19	80 201	0 2040	2070	Moy. 3 sim.	92	75	-17	-20	-0,29
s *	200				AEV bTq	0,97	1,10	0,13	13	0
de jou <b>ingl,</b> i <b>plet</b> ⇒	150				AHJ	0,90	1,27	0,37	41	0,01
nbre o État e ncom	100 50			]	BBHI	1,00	0,67	-0,33	-33	-0,01
Nor ×	0 19	80 201	0 2040	2070	Moy. 3 sim.	0,96	1,01	NM	NM	NM
s	200				AEV bTq	78	56	-22	-29	-0,37
te jou <b>ngl,</b> nce »	150				AHJ	42	44	1	3	0,02
nbre c État e orése	100		and the second		BBHI	73	52	-21	-29	-0,35
Nor Solar	0	80 201	0 2040	2070	Moy. 3 sim.	64	50	NM	NM	NM

Tableau A	21. Évo	lution de	e la saison	glacielle e	t de l'état	d'englacement	sur le
bas estran	pour le	passé ré	cent et l'ho	rizon 2055	sur le site	de Penouille 4-	·5

\*NM (non moyenné) : Les moyennes n'ont pas été calculées lorsque les tendances des différentes simulations n'allaient pas toutes dans les mêmes directions (évolutions positives et négatives).

Tableau A 22. Évolution de la protection de la côte grâce au développement verticale du pied de glace de haut estran et du développement de la glace sur le bas estran sur le site de Penouille 4-5

Protectio développ le haut es su	n de la côte, grâce au ement de la glace sur tran (verticalement) et r le bas estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ırs côte	200	AEV bTq	162	124	-38	-24	-0,64
de jou h à la c é » ou	150	AHJ	175	156	-19	-11	-0,31
mbre ection é éleve	50	BBHI	145	105	-41	-28	-0,68
prot	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	161	128	-33	-21	-0,54









oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



# Chandler

## Passé récent

Sur le site de Chandler, les résultats montrent qu'au cours du passé récent, la saison glacielle débutait le 6 janvier en moyenne sur le haut estran et le bas estran et prenait fin sur le bas estran le 20 mars sur le bas estran et le 2 avril sur le haut estran (tableau A 23). La saison glacielle durait alors 85 jours sur le haut estran et 74 jours sur le bas estran (tableau A 24 et tableau A 25). Sous ces conditions, la glace du bas estran et du haut estran assurait une protection contre le contact entre les agents hydrodynamiques et les falaises (rocheuse à la base) durant 71 jours (tableau A 26).

## Horizon 2055

Les résultats des simulations pour l'horizon montrent que la saison glacielle perdra 49 jours sur le haut estran pour s'établir à une durée totale de seulement 35 jours (tableau A 24). Sur le bas estran, la saison glacielle perdra 46 jours pour s'établir à 26 jours (tableau A 25). Ainsi, la saison glacielle débutera alors le 29 janvier sur le haut estran et le 23 janvier (séquence non respectée) et se terminera dès le 28 février sur le bas estran puis le 16 mars sur le haut estran (tableau A 23).



#### Tableau A 23. Évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le site de Chandler

	Haut estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ດ ເ	200	AEV bTq	84	35	-50	-59	-0,83
le jou <b>laciel</b>	150	AHJ	85	56	-29	-34	-0,48
nbre o son g	100	BBHI	84	15	-69	-82	-1,15
Nor <b>Sai</b> :	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	84	35	-49	-58	-0,82
S	200	AEV bTq	56	11	-45	-80	-0,75
de jou ingl, olet »	150	AHJ	56	20	-36	-64	-0,6
nbre ( État e com	50	BBHI	13	0	-13	-99	-0,22
Nor *	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	42	10	-31	-81	-0,52
s «	200	AEV bTq	11,17	8,00	-3,17	-28	-0,05
de jou <b>ngl,</b> i <b>plet</b> ⇒	150	AHJ	11,13	15,57	4,44	40	0,07
nbre o État e ncom	50	BBHI	19,70	0,27	-19,43	-99	-0,32
Nor ×	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	14,00	7,95	NM	NM	NM
s	200	AEV bTq	17	15	-2	-11	-0,03
de jou ngl, nce »	150	AHJ	18	19	2	11	0,03
nbre ( État e prése	50	BBHI	46	15	-32	-68	-0,53
Nor Nor	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	27	16	NM	NM	NM

Tableau A 24. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le haut estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Chandler

\*NM (non moyenné) : Les moyennes n'ont pas été calculées lorsque les tendances des différences simulations n'allaient pas toutes dans les mêmes directions (évolutions positives et négatives).

	Bas	s estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ა <b>მ</b>	200	· · · · ]	AEV bTq	76	23	-53	-70	-0,89
le jou <b>laciel</b>	150		AHJ	73	47	-26	-35	-0,43
abre c <b>son g</b> l	100		BBHI	68	8	-60	-88	-1,00
Non Sais	0	0 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	72	26	-46	-64	-0,77
S	200	· · · · ]	AEV bTq	2	0	-2	-100	-0,03
le jou <b>ngl,</b>	150		AHJ	1	1	-1	-47	-0,01
ibre o État e comp	100		BBHI	1	0	-1	-97	-0,02
Non S	0	0 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	1	0	-1	-81	-0,02
S A	200	· · · ]	AEV bTq	0	0	0	na	na
le jour <b>ngl,</b> <b>plet</b> »	150		AHJ	0	0	0	na	na
ibre d Etat e	100		BBHI	0	0	0	na	na
× Nor Nor	0 198	0 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0	0	0	na	na
S	200	· · · ]	AEV bTq	75	23	-52	-70	-0,87
de jou engl, ence »	150		AHJ	71	45	-26	-36	-0,43
mbre ( État ε prése	50		BBHI	66	8	-58	-88	-0,97
Nor *	0	0 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	70	25	-45	-65	-0,76

Tableau A	25. Évol	ution de	la saison	glacielle	et de l	'état d	d'englacement	sur le
bas estran	pour le p	bassé réc	ent et l'ho	orizon 205	5 sur le	e site o	de Chandler	

# Tableau A 26. Évolution de la protection de la côte grâce au développement verticale du pied de glace de haut estran et du développement de la glace sur le bas estran sur le site de Chandler

Protectio développ le haut es si	on de la côte, grâce au pement de la glace sur stran (verticalement) et ur le bas estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
rs côte	200	AEV bTq	82	26	-56	-69	-0,94
de jou h à la c é » ou plet »	150	AHJ	77	44	-33	-43	-0,55
ection éction éleve	50	BBHI	56	2	-55	-97	-0,91
prot	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	72	24	-48	-70	-0,80



Dev. vertical HE bbhi 2000 - 0 1 2 3 2050 -2040 -2030 -2020 -2010 -2000 -1990 -

oct nov dec jan fevmar avr mai jun jul aou sep







oct nov dec jan fevmar avr mai jun jul aou sep



# Maria

### Passé récent

Sur le site d'étude de Maria, les simulations indiquent que la saison glacielle débutait le 29 décembre sur le haut estran et à quelques jours près sur le bas estran, soit le 3 janvier (tableau A 27). Après avoir duré en moyenne 88 jours sur le haut estran et 68 jours sur le bas estran, la saison prend fin le 11 mars sur le bas estran puis le 29 mars sur le haut estran (tableau A 27 et tableau A 28 et tableau A 29). Le développement de la glace assurait 72 jours de protection contre l'érosion latérale (tableau A 30).

### Horizon 2055

Pour l'horizon 2055, les simulations annoncent que la saison débutera 12 jours plus tard, tant sur le haut que sur le bas estran, et débutera alors le 9 janvier et le 15 janvier respectivement (tableau A 27). Elle perdra 25 jours sur le haut estran et 30 jours sur le bas estran et durera alors 63 et 38 jours respectivement (tableau A 28 et tableau A 29). Il s'agit de baisses de l'ordre de 45 % et 57 %. Le pied de glace sera bien développé durant 33 jours sur le haut estran et 4 jours seulement sur le bas estran. Sous de telles conditions, la glace assure une protection contre l'érosion côtière durant seulement 35 jours. Il s'agit d'une diminution de l'ordre de 52 % (-38 jours) (tableau A 30).

		– Haut estran, passé récen	t						
		- <del></del> Haut estran, horizon 205	5	•		•			
		Bas estran, passé récent							
		- ← - Bas estran, horizon 2055	11-Nov 26-Nov 11-Dec	26-Dec 10-Jan	25-Jan 9-Feb	24-Feb 11-Mar 26-Mar	10-Apr 25-Apr 10-May		
	Simulations		DÉBUT				FIN		
	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Tx (j/an)	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Tx (j/an)
u	AEV bTq	31 déc.	13 janv.	13	0,25	2 avr.	17 mars	-16	-0,32
estra	AHJ	14 déc.	25 déc	11	0.21	00	11	40	0.00
Ψ			20 000.		0,21	23 mars	11 mars	-12	-0,20
aut	BBHI	10 janv.	21 janv.	11	0,21	23 mars 2 avr.	14 mars	-12	-0,20
Haut	BBHI moy. 3 sim.	10 janv. 29 déc.	21 janv. 9 janv.	11 12	0,27	23 mars 2 avr. <b>29 mars</b>	14 mars	-12 -18 -15	-0,20 -0,40 -0,31
n Haut	BBHI <b>moy. 3 sim.</b> AEV bTq	10 janv. 29 déc. 5 janv.	21 janv. 9 janv. 19 janv.	11 12 14	0,21 0,27 0,24 0,24	23 mars 2 avr. 29 mars 19 mars	14 mars 14 mars 14 mars 27 févr.	-12 -18 -15 -20	-0,20 -0,40 -0,31 -0,36
stran Haut	BBHI <b>moy. 3 sim.</b> AEV bTq AHJ	10 janv. 29 déc. 5 janv. 19 déc.	21 janv. 9 janv. 19 janv. 29 déc.	11 12 14 10	0,27 0,24 0,24 0,24 0,18	23 mars 2 avr. 29 mars 19 mars 4 mars	14 mars 14 mars 27 févr. 21 févr.	-12 -18 -15 -20 -12	-0,20 -0,40 -0,31 -0,36 -0,19
as estran Haut	BBHI moy. 3 sim. AEV bTq AHJ BBHI	10 janv. 29 déc. 5 janv. 19 déc. 15 janv.	21 janv. 9 janv. 19 janv. 29 déc. 27 janv.	11 12 14 10 12	0,21 0,27 0,24 0,24 0,18 0,22	23 mars 2 avr. 29 mars 19 mars 4 mars 11 mars	14 mars           14 mars           27 févr.           21 févr.           19 févr.	-12 -18 -15 -20 -12 -20	-0,20 -0,40 -0,31 -0,36 -0,19 -0,37

## Tableau A 27. Évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le site de Maria

	Haut estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ର <b>ଚ</b>	200	AEV bTq	87	50	-36	-42	-0,60
le jou <b>aciel</b>	150	AHJ	99	74	-25	-25	-0,42
ibre d on gl	100	BBHI	81	27	-54	-67	-0,89
Nom Sais	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	89	50	-38	-45	-0,64
ទ	200	AEV bTq	69	23	-46	-67	-0,76
de jou ngl, olet »	150	AHJ	64	28	-36	-57	-0,61
mbre o État e comp	50	BBHI	19	2	-17	-90	-0,29
« Nor	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	51	18	-33	-71	-0,55
rs *	200	AEV bTq	0,07	0,17	0,10	143	<0,00
le jou <b>ngl,</b>	150	AHJ	0,03	0,00	-0,03	-100	<0,00
∩bre o État e ncom	100	BBHI	0,10	0,00	-0,10	-100	<0,00
Non ×	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0,07	0,06	NM	NM	NM
δ	200	AEV bTq	18	27	9	53	0,16
le joui n <b>gl,</b> nce »	150	AHJ	34	46	12	34	0,19
mbre d État el présel	100	BBHI	61	25	-36	-59	-0,61
« Noi	0	Moy. 3 sim.	38	33	NM	NM	NM

Tableau A 28. Évolution de la sa	son glacielle et	de l'état d'englac	ement sur le
haut estran pour le passé récent e	t l'horizon 2055	sur le site de Mari	a

\*NM (non moyenné) : Les moyennes n'ont pas été calculées lorsque les tendances des différences simulations n'allaient pas toutes dans les mêmes directions (évolutions positives et négatives).

	Ba	is estran		Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ა <b>მ</b>	200	· ·	]	AEV bTq	74	30	-44	-59	-0,73
de jou <b>laciel</b>	150			AHJ	74	51	-23	-31	-0,38
nbre c <b>son g</b>	100 50			BBHI	53	10	-44	-82	-0,73
Nor <b>Sai</b> :	0	80 2010 2040 20	) 70_	Moy. 3 sim.	67	30	-37	-57	-0,61
ទ	200	· · ·	]	AEV bTq	18	2	-17	-91	-0,28
de jou ingl, olet »	150			AHJ	16	4	-12	-75	-0,20
nbre o État e comp	50			BBHI	5	0	-4	-96	-0,07
Nor ×	0 19	80 2010 2040 20	) 70	Moy. 3 sim.	13	2	-11	-87	-0,18
LS Q	200	· ·	]	AEV bTq	0,53	0,03	-0,50	-94	-0,01
de jou ingl, iplet ,	150			AHJ	0,50	0,13	-0,37	-74	-0,01
nbre ( État e ncorr	50			BBHI	0,20	0,00	-0,20	-100	<0,00
Nor ×	0 198	80 2010 2040 20	) 70	Moy. 3 sim.	0,41	0,05	0,00	-89	-0,01
ي ب	200		]	AEV bTq	55	28	-27	-49	-0,45
de jour <b>sngl</b> , <b>snce</b> »	150			AHJ	57	47	-11	-19	-0,18
mbre ∣ État € prés€	50	- And		BBHI	48	9	-39	-81	-0,65
Nor *	0 198	80 2010 2040 20	)70	Moy. 3 sim.	54	28	-26	-50	-0,43

 Tableau A 29. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le bas estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Maria

# Tableau A 30. Évolution de la protection de la côte grâce au développement verticale du pied de glace de haut estran et du développement de la glace sur le bas estran sur le site de Maria

Protectio développ le haut es	on de la côte, grâce au pement de la glace sur stran (verticalement) et ur le bas estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
rs côte	200	AEV bTq	83	38	-44	-54	-0,74
de jou h à la c é » ou plet »	150	AHJ	89	60	-29	-33	-0,48
ection éction éleve	50	BBHI	46	6	-40	-86	-0,66
prot	0	Moy. 3 sim.	72	35	-38	-58	-0,63





Dev. vertical HE bbhi 2000 - 0 1 2 3 2050 -2040 -2030 -2010 -2010 -2000 -1990 -

oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep





oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



# Pointe-Verte

## Passé récent

Sur le site de Pointe-Verte, les simulations indiquent qu'au cours du passé récent, la saison glacielle débutait en moyenne le 15 décembre sur le haut estran et une dizaine de jours plus tard, soit le 25 décembre sur le bas estran (tableau A 31). La saison glacielle prenait fin, d'abord sur le bas estran, le 13 mars en moyenne puis le 3 avril en moyenne sur le haut estran (tableau A 31). Sur le haut estran, la saison glacielle durait en moyenne 108 jours au cours desquels le pied de glace était « complet » durant 69 jours en moyenne (64 % de la durée de la saison) (tableau A 32). Sur le bas estran, la saison glacielle durait en moyenne (64 % de la durée de la saison) (tableau A 32). Sur le bas estran, la saison glacielle durait en moyenne 77 jours au cours desquels le pied de glace était « complet » durant 49 jours (70 % de la durée de la saison) (tableau A 33). Au total, les simulations indiquent que les entités glacielles de haut et de bas estran devaient être suffisamment développées pour limiter les contacts entre les agents hydrodynamiques et la côte durant 106 jours en moyenne (tableau A 34).

## Horizon 2055

Sous les conditions climatiques simulées pour la période 2041-2070, la durée de la saison glacielle diminue pour s'établir à une moyenne de 69 jours sur le haut estran (tableau A 32). On prévoit qu'elle débute, en moyenne, le 31 décembre et prenne fin, en moyenne, le 17 mars (tableau A 31). Durant la saison glacielle, les résultats des simulations indiquent que l'englacement atteint un stade « complet » durant 48 jours, ce qui représente 70 % de la durée de la saison glacielle (tableau A 32). Sur le bas estran, la durée de la saison glacielle (tableau A 32). Sur le bas estran, la durée de la saison glacielle s'abaisse à 39 jours (-38 jours par rapport au passé récent) (tableau A 33). La saison glacielle sera comprise, en moyenne, entre le 6 janvier et le 22 février (tableau A 31). Au total, les entités glacielles de haut et de bas estran devraient limiter le contact entre la côte et les agents hydrodynamique durant 74 jours, soit durant 32 jours de moins qu'au cours de l'intervalle 1981-2010 (tableau A 34).



# Tableau A 31. Évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le site de Pointe-Verte

	Haut estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
Nombre de jours Saison glacielle	200	AEV bTq	111	72	-39	-35	-0,65
	150	AHJ	118	92	-26	-22	-0,43
	50	BBHI	96	42	-54	-56	-0,89
	0	Moy. 3 sim.	108	69	-40	-38	-0,66
Nombre de jours État engl, « complet »	200	AEV bTq	69	52	-17	-25	-0,28
	150	AHJ	93	78	-15	-16	-0,25
	50	BBHI	46	14	-32	-69	-0,53
	0	Moy. 3 sim.	69	48	-21	-37	-0,35
Nombre de jours État engl, « incomplet »	200	AEV bTq	4,37	0,80	-3,57	-82	-0,06
	150	AHJ	0,83	0,67	-0,16	-19	0,00
	50	BBHI	6,87	0,30	-6,57	-96	-0,11
	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	4,02	0,59	-3	-66	-0,06
Nombre de jours État engl, « présence »	200	AEV bTq	38	19	-19	-49	-0,31
	150	AHJ	24	13	-11	-47	-0,19
	50	BBHI	42	28	-15	-35	-0,25
	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	35	20	-15	-44	-0,25

 Tableau A 32. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le haut estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Pointe-Verte

Bas estran		Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
Nombre de jours Saison glacielle	200	AEV bTq	83	38	-45	-54	-0,75
	150	AHJ	87	65	-22	-25	-0,36
	100	BBHI	62	14	-48	-77	-0,80
	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	77	39	-38	-52	-0,64
Nombre de jours État engl, « complet »	200	AEV bTq	63	18	-45	-72	-0,75
	150	AHJ	59	34	-25	-43	-0,42
	50	BBHI	25	2	-23	-90	-0,38
	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	49	18	-31	-68	-0,52
Nombre de jours État engl, « incomplet »	200	AEV bTq	2,13	1,10	-1,03	-48	-0,02
	150	AHJ	2,23	1,23	-1,00	-45	-0,02
	100	BBHI	1,07	0,20	-0,87	-81	-0,01
	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	1,81	0,84	-1,00	-58	-0,02
Nombre de jours État engl, « présence »	200	AEV bTq	18	19	1	5	0,02
	150	AHJ	25	30	5	19	0,08
	100	BBHI	36	11	-25	-69	-0,41
	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	26	20	NM	NM	NM

Tableau A 33. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le bas estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Pointe-Verte

\*NM (non moyenné) : Les moyennes n'ont pas été calculées lorsque les tendances des différentes simulations n'allaient pas toutes dans les mêmes directions (évolutions positives et négatives).
# Tableau A 34. Évolution de la protection de la côte grâce au développement verticale du pied de glace de haut estran et du développement de la glace sur le bas estran sur le site de Pointe-Verte

Protectio dévelop le haut es	on de la côte, grâce au pement de la glace sur stran (verticalement) et ur le bas estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
rrs côte	200	AEV bTq	106	81	-25	-23	-0,41
de jou h à la ( é » ou plet »	150	AHJ	125	105	-20	-16	-0,33
ection éction é éleve	50	BBHI	86	35	-51	-59	-0,85
prot	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	106	74	-32	-33	-0,53







oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep











# La Martinique

#### Passé récent

Sur le site de La Martinique, les résultats des simulations pour le passé récent (1981-2010) indiquent que la saison glacielle débutait le 11 décembre et prenait fin le 16 avril pour une durée totale de 126 jours en moyenne (tableau A 35 et tableau A 36). Durant la saison glacielle, la glace était, selon les simulations, suffisamment bien développée pour assurer une protection à la côte contre les agents hydrodynamiques durant en moyenne 107 jours (tableau A 37).

#### Horizon 2055

Les conditions prédites pour l'horizon 2055 (2041-2070) montrent que la saison glacielle ne durerait plus que, en moyenne, 47 jours en débutant 13 jours plus tard et en terminant 46 jours plus tôt (tableau A 35). Sous de telles conditions, on ne compterait plus que 43 jours de glace suffisamment bien développée pour assurer une protection complète (tableau A 36). On s'entend donc à une réduction de la durée de la saison glacielle de l'ordre de 47 % et à une réduction du nombre de jours de protection de 60 %. On remarque d'ailleurs que, sous les conditions les plus chaudes (BBHI), le nombre de jours de protection « complète » assurée par la glace atteint 0 jour avant l'année 2070 (tableau A 37).



Tableau A 35. Évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le site de La Martinique d'après les résultats des simulations

	Ha	ut estra	n		Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ა <b>მ</b>	200				AEV bTq	128	56	-72	-56	-1,2
le jour l <b>aciel</b>	150				AHJ	132	95	-36	-27	-0,6
abre d son gl	100		$\overline{\ }$		BBHI	117	25	-92	-79	-1,53
Non Sais	0 198	30 2010	2040	2070	Moy. 3 sim.	125	59	-67	-53	-1,12
S	200	· · · ·			AEV bTq	86	19	-67	-78	-1,12
te jou ngl, olet »	150				AHJ	88	42	-46	-52	-0,77
nbre c État e comp	100				BBHI	55	3	-52	-95	-0,87
Nor *	0 198	30 2010	2040	2070	Moy. 3 sim.	76	21	-55	-72	-0,92
S .	200				AEV bTq	11	5	-7	-61	-0,12
le joui <b>ngl,</b> plet <sub>»</sub>	150				AHJ	14	18	5	36	0,08
ibre c État e	100				BBHI	15	1	-14	-92	-0,23
Non *	0	30 2010	2040	2070	Moy. 3 sim.	13	8	NM	NM	NM
δ	200				AEV bTq	24	30	5	21	0,08
te jou <b>ngl,</b> nce »	150				AHJ	27	31	4	15	0,07
nbre c État e orése	100	******			BBHI	40	21	-20	-50	-0,33
Non Non Non	0	30 2010	2040	2070	Moy. 3 sim.	31	27	NM	NM	NM

Tableau A 36. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le haut estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de La Martinique

# Tableau A 37. Évolution de la protection de la côte grâce au développement verticale du pied de glace de haut estran et du développement de la glace sur le bas estran sur le site de La Martinique

Protectio dévelo la glao	on de la côte, grâce au ppement vertical de ce sur le haut estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
irs côte	200	AEV bTq	112	42	-70	-63	-1,17
de jou h à la ( é » ou plet »	150	AHJ	113	76	-38	-34	-0,63
ectior éctior ééleve	50	BBHI	94	11	-84	-89	-1,4
prot	0	Moy. 3 sim.	107	43	-64	-60	-1,07



oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



Dev. vertical HE bbhi

oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



## Pointe-aux-Loups

#### Passé récent

Au cours de l'intervalle 1981-2010, les résultats des simulations pour le site de Pointe-aux-Loups indiquent que la saison glacielle débutait en moyenne autour du 5 janvier et s'étirait en moyenne jusqu'au 2 mai (tableau A 38). La saison glacielle moyenne durait ainsi 117 jours (tableau A 39). Durant la saison glacielle, la glace assurait, en moyenne, 71 jours de protection complète à la côte selon les simulations (tableau A 40).

#### Horizon 2055

Les simulations pour l'intervalle 2041-2070 prévoient que la saison glacielle débutera 23 jours plus tard et se terminera 34 jours plus tôt qu'au cours du passé récent (tableau A 38). La saison glacielle débuterait alors, en moyenne, le 28 janvier et prendrait fin le 29 mars pour ne durer que 60 jours (tableau A 39). Les simulations indiquent que le nombre de jours de protection complète par la glace diminuerait de 57 jours pour s'établir à un total de seulement 14 jours de protection (tableau A 40). Cette diminution est de l'ordre de 81 %.



Tableau A 38. Évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le site de Pointe-aux-Loups d'après les résultats des simulations

	Haut estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
rs <b>e</b>	200	AEV bTq	108	51	-57	-53	-0,95
te jou <b>laciel</b>	150	AHJ	120	72	-48	-40	-0,8
nbre o <b>son g</b>	100	BBHI	122	45	-78	-64	-1,3
Nor <b>Sai</b>	0	Moy. 3 sim.	117	56	-61	-52	-1,02
S	200	AEV bTq	22	1	-21	-96	-0,35
de jou ngl, olet »	150	AHJ	35	6	-29	-83	-0,48
mbre ( État e com	50	BBHI	34	1	-33	-98	-0,55
Nor «	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	30	2	-28	-93	-0,47
হ *	200	AEV bTq	7	1	-6	-81	-0,1
de jou <b>ngl,</b> i <b>plet</b> ⇒	150	AHJ	11	5	-6	-53	-0,1
nbre c État e ncom		BBHI	14	2	-13	-92	-0,22
Nor ×	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	11	3	-8	-73	-0,13
S	200	AEV bTq	76	46	-31	-41	-0,52
de jou ngl, nce »	150	AHJ	72	57	-15	-21	-0,25
nbre ( État e orése	50	BBHI	74	42	-31	-42	-0,52
NoN NoN	0 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	74	48	-26	-35	-0,43

Tableau A 39. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le haut estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Pointe-aux-Loups

Tableau A 40. Évolu	tion de la protection	de la côte grâce a	u développement
verticale du pied de	glace de haut estran e	t du développement	de la glace sur le
bas estran sur le site	de Pointe-aux-Loups		

Protectio dévelo la glao	on de la côte, grâce au ppement vertical de ce sur le haut estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ırs côte	200	AEV bTq	55	7	-48	-87	-0,8
de jou n à la c é » ou plet »	150	AHJ	75	28	-47	-62	-0,78
ectior éctior é élev	50	BBHI	81	6	-75	-92	-1,25
prot 0	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	71	14	-57	-81	-0.95





# Pointe-Lebel

### Passé récent

Sur le site de Pointe-Lebel, les simulations indiquent qu'au cours de la période 1981-2010, la saison glacielle débutait sur le haut estran dès le 9 novembre puis sur le bas estran le 4 décembre, soit près d'un mois plus tard (tableau A 1). La saison glacielle prenait fin le 1er mars sur le bas estran et le 16 avril sur le haut estran. La saison glacielle durait ainsi en moyenne 147 jours sur le haut estran et 95 jours sur le bas estran (tableau A 2 et tableau A 3). Le développement de la glace (haut estran verticalement et bas estran) offrait 117 jours de protection contre l'érosion par les agents hydrodynamiques (tableau A 44).

### Horizon 2055

Les simulations pour l'horizon 2055 indiquent que la saison glacielle débutera avec 13 jours de retard tant sur le haut estran que sur le bas estran, soit le 21 novembre et le 17 décembre respectivement (tableau A 1). La saison prendra fin sur le bas estran avec 27 jours d'avance, soit le 10 février puis sur le haut estran avec 22 jours d'avance, soit le 14 mars. La saison glacielle durera, pour l'horizon 2055, 42 % moins longtemps que durant le passé récent sur le bas estran en passant de 95 jours à 55 jours (-40 jours) (tableau A 3). Sur le haut estran, l'évolution de la durée de la saison glacielle est un peu moins sévère avec une diminution de l'ordre 24 %, soit de 147 jours à 112 jours (-35 jours) (tableau A 2). Selon les résultats des simulations, la glace limitera le contact entre la mer et la falaise durant 75 jours, soit 42 jours de moins qu'au cours du passé récent (tableau A 44).



#### Tableau A 41. Évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le site de Pointe-Lebel

	Haut es	stran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ດ <u>ອ</u>	200		AEV bTq	153	116	-37	-24	-0,61
de jou <b>laciel</b>	150		AHJ	158	138	-20	-13	-0,33
nbre o son g	50		BBHI	129	76	-53	-41	-0,88
Nor Sai:	0 1980 2	2010 2040 2070_	Moy. 3 sim.	147	110	-37	-26	-0,61
S	200		AEV bTq	96	50	-47	-48	-0,78
de jou engl, plet »	150		AHJ	109	68	-41	-38	-0,68
mbre ( État € com	50		BBHI	53	14	-39	-74	-0,65
× Nor	0 1980 2	2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	86	44	-42	-53	-0,7
s é	200		AEV bTq	16	24	7	45	0,12
de jou <b>ngl,</b> i <b>plet</b> ⇒	150		AHJ	17	22	5	29	0,08
nbre o État e ncom	50		BBHI	24	16	-9	-35	-0,14
Nor ×	0	2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	19	21	NM	NM	NM
S	200		AEV bTq	40	43	2	6	0,04
le jou <b>ngl,</b> nce »	150		AHJ	32	48	16	50	0,27
nbre c État e prése	50	-	BBHI	51	45	-6	-11	-0,1
Nor Solar	0	2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	41	45	NM	NM	NM

Tableau A 42. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le haut estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Pointe-Lebel

	Ba	s estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ຽ <b>ອ</b>	200	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	AEV bTq	105	53	-52	-49	-0,86
de jour <b>Jaciel</b>	150		AHJ	108	85	-24	-22	-0,39
nbre son ç	50		BBHI	69	21	-48	-69	-0,79
Nor <b>Sai</b>	0	30 2010 2040 2070_	Moy. 3 sim.	94	53	-41	-47	-0,68
ร	200		AEV bTq	20	1	-19	-94	-0,32
de jou ingl, olet »	150		AHJ	26	5	-21	-79	-0,34
nbre ( État e com	50		BBHI	5	0	-5	-99	-0,08
Nor 	0 198	30 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	17	2	-15	-91	-0,25
s *	200		AEV bTq	0	0	0	-57	0
de jou engl, plet	150		AHJ	1	0	-1	-86	-0,01
nbre État € ncon	50		BBHI	0	0	0	-100	0
Nor * i	0 198	30 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0	0	0	-81	0,00
S	200	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	AEV bTq	81	47	-34	-42	-0,57
de jou⊧ <b>∍ngl,</b> ∍nce »	150		AHJ	78	71	-7	-9	-0,12
mbre État ∉ prés€	50		BBHI	60	19	-41	-68	-0,68
Noi *	0 198	30 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	73	46	-27	-40	-0,46

 Tableau A 43. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le bas estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Pointe-Lebel

# Tableau A 44. Évolution de la protection de la côte grâce au développement verticale du pied de glace de haut estran et du développement de la glace sur le bas estran sur le site de Pointe-Lebel

Protectio développ le haut es si	on de la côte, grâce au pement de la glace sur stran (verticalement) et ur le bas estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
irs côte	200	AEV bTq	124	83	-41	-33	-0,68
de jou h à la c é » ou plet »	150	AHJ	133	104	-29	-22	-0,48
ectior éctior ééleve	50	BBHI	96	38	-58	-60	-0,96
prot	0	Moy. 3 sim.	117	75	-42	-36	-0,71



oct novdec jan fevmar avr mai jun jul aou sep

Dev. vertical HE bbhi 2000 2050 2040 2020 2010 2010 2010 2000 2010

oct nov dec jan fevmar avr mai jun jul aou sep





oct nov dec jan fevmar avr mai jun jul aou sep



# **Baie Saint-Ludger**

#### Passé récent

Sur le site de Baie Saint-Luger, les simulations indiquent qu'au cours de l'intervalle 1981-2010, la saison glacielle débutait, en moyenne, le 23 novembre sur le haut estran et le 1er décembre sur le bas estran (tableau A 45) et prenait fin le 9 mars sur le bas estran et le 4 avril sur le haut estran. La saison durant alors 98 jours sur le bas estran et 132 jours sur le haut estran (tableau A 46 et tableau A 47). Toujours selon les simulations, les entités glacielles de haut et de bas estran étaient suffisamment développées pour limiter le contact entre les agents hydrodynamiques et la côte durant 109 jours en moyenne (tableau A 48).

#### Horizon 2055

Pour l'horizon 2055, les simulations annoncent que la saison glacielle sera écourtée de 40 jours sur le bas estran et de 35 jours sur le haut estran. Sur le haut estran de même que sur le bas estran, elle débutera 13 jours plus tard qu'au cours du passé récent, soit le 5 décembre et le 14 décembre respectivement (tableau A 45). La saison se terminera très tôt, soit en moyenne le 10 février sur le bas estran puis le 12 mars sur le haut estran. Cette fin précoce représente une avance de 27 et de 22 jours par rapport au passé récent. La durée de la saison glacielle ainsi écourtée s'établit à 97 jours sur le haut estran et à 58 jours en moyenne sur le bas estran (tableau A 46 et tableau A 47). Les entités glacielles de haut et de bas estran seront suffisamment développées pour limiter le contact entre les agents hydrodynamiques et la côte durant 68 jours ce qui correspond à une diminution de 41 jours par rapport au passé récent (tableau A 48).



#### Tableau A 45. Évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le site de Baie-Saint-Ludger

	Haut estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ം <b>ല</b>	200	AEV bTq	138	101	-37	-27	-0,62
de jou <b>laciel</b>	150	AHJ	143	124	-19	-14	-0,32
nbre c <b>son g</b>	100	BBHI	114	60	-54	-47	-0,9
Nor <b>Sai</b> :	0	Moy. 3 sim.	132	95	-37	-29	-0,61
ស	200	AEV bTq	105	58	-47	-45	-0,78
de jou ingl, olet »	150	AHJ	110	84	-26	-24	-0,43
mbre ( État e com	50	BBHI	67	20	-47	-70	-0,79
Nor *	0	Moy. 3 sim.	94	54	-40	-46	-0,67
S ×	200	AEV bTq	0,27	0,20	-0,07	-26	0,00
de jou <b>ingl,</b> i <b>plet</b> ⇒	150	AHJ	0,17	0,30	0,13	76	0,00
nbre c État e ncom	100	BBHI	0,33	0,20	-0,13	-39	0,00
Nor ×	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0,26	0,23	NM	NM	NM
δ	200	AEV bTq	32	43	10	31	0,17
de jou i <b>ngl,</b> ince »	150	AHJ	33	40	6	19	0,11
nbre ( État e prése	50	BBHI	46	40	-6	-13	-0,1
Nor Nor	0	Moy. 3 sim.	37	41	NM	NM	NM

Tableau A 46. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le haut estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Baie-Saint-Ludger

	Ba	as estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
s s	200		AEV bTq	108	59	-49	-46	-0,82
de jou <b>jlaciel</b>	150		AHJ	113	87	-25	-22	-0,42
nbre son ç	50		BBHI	72	24	-48	-67	-0,80
Nor <b>Sai</b>	0 198	80 2010 2040 2070_	Moy. 3 sim.	98	57	-41	-45	-0,68
IS	200	· · · · ]	AEV bTq	11	1	-10	-91	-0,17
de jou ngl, olet »	150		AHJ	17	3	-13	-81	-0,22
mbre o État e comp	100 50		BBHI	3	0	-3	-100	-0,05
Nor «	0 19	80 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	10	1	-9	-91	-0,15
s *	200	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	AEV bTq	0,23	0,03	-0,20	-87	0
de jou engl, iplet	150		AHJ	0,53	0,20	-0,33	-62	-0,01
nbre ( État € ncon	50		BBHI	0,23	0,00	-0,23	-100	0
Nor s	0 198	80 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0,33	0,08	0	-83	0,00
S	200		AEV bTq	92	52	-40	-43	-0,67
de jou <b>engl,</b> ∍nce »	150		AHJ	92	75	-16	-18	-0,27
mbre État ( prése	50		BBHI	65	23	-43	-65	-0,71
Nor *	0 198	80 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	83	50	-33	-42	-0,55

Tableau A 47. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le bas estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Baie-Saint-Ludger

Tableau A 48. Évolution de la protection de la côte grâce au développement verticale du pied de glace de haut estran et du développement de la glace sur le bas estran sur le site de Baie-Saint-Ludger

Protectio dévelop le haut es	on de la côte, grâce au pement de la glace sur stran (verticalement) et ur le bas estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
rrs côte	200	AEV bTq	118	73	-44	-38	-0,74
de jou n à la c é » ou plet »	150	AHJ	125	102	-23	-19	-0,39
ectior éctior ééleve	50	BBHI	84	29	-55	-66	-0,92
prot	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	109	68	-41	-38	-0,68

2070



oct novdec jan fevmar avr mai jun jul aou sep



Dev. vertical HE bbhi

oct nov dec jan fevmar avr mai jun jul aou sep







oct nov dec jan fevmar avr mai jun jul aou sep



### Rivière Pentecôte

#### Passé récent

Au cours du passé récent, les résultats des simulations et relations empiriques indiquent que la saison glacielle débutait le 23 décembre sur le haut estran et prenait fin le 23 avril (tableau A 49). Sur le bas estran, la saison glacielle était plus courte et débutait le 29 décembre et prenait fin le 31 mars (tableau A 49). La saison glacielle durait en moyenne 120 jours sur le haut estran et 91 jours sur le bas estran (tableau A 50 et A 51). Au total, la glace assurait 76 jours de protection contre l'érosion latérale attribuable aux agents hydrodynamiques (tableau A 52).

#### Horizon 2055

Pour la période 2041-2070, la saison glacielle est moins longue. Sur le haut estran, elle débute le 29 décembre, se termine le 5 avril et ne dure plus que 81 jours (tableau A 49 et A 50). Cette diminution est de l'ordre de 33 %. Sur le bas estran, la saison glacielle débute le 13 janvier, se termine le 6 mars et ne dure plus que 44 jours. La diminution est de l'ordre de 52 % (tableau A 49 et A 50). Le pied de glace de haut et de bas estran n'assure plus que 26 jours de protection contre l'érosion par les agents hydrodynamiques (tableau A 52).



#### Tableau A 49. Évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le site de Rivière Pentecôte

	Haut estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ം <mark>ല</mark>	200	AEV bTq	115	77	-38	-33	-0,64
de jou <b>laciel</b>	150	AHJ	123	99	-23	-19	-0,39
nbre ( <b>son g</b>	50	BBHI	122	66	-56	-46	-0,93
Nor <b>Sai</b> :	0	Moy. 3 sim.	120	81	-39	-33	-0,65
ស	200	AEV bTq	48	7	-41	-85	-0,68
de jou ingl, olet »	150	AHJ	35	4	-31	-88	-0,51
mbre ( État e com	50	BBHI	37	1	-36	-97	-0,6
Nor *	0 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	40	4	-36	-90	-0,60
ខ	200	AEV bTq	0,50	5,60	5,10	1020	0,09
de jou ingl, iplet	150	AHJ	0,53	0,90	0,37	70	0,01
nbre ( État e ncon	50	BBHI	0,17	0,43	0,26	153	<0,00
Nor s	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0,40	2,31	2	414	0,03
ទ	200	AEV bTq	67	64	-3	-4	-0,05
le jou <b>ngl,</b> nce »	150	AHJ	87	94	7	8	0,11
nbre ( État e orése	50	BBHI	85	65	-20	-24	-0,34
Nor * *	0	Moy. 3 sim.	80	74	NM	NM	NM

Tableau A 50. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le haut estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Rivière Pentecôte

	Ва	as estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ပ် <b>ခ</b>	200	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	AEV bTq	88	37	-51	-58	-0,85
le jour <b>laciel</b>	150		AHJ	96	62	-33	-35	-0,56
nbre c <b>son g</b>	100 50		BBHI	90	32	-58	-64	-0,97
Nor Sai:	0	80 2010 2040 2070_	Moy. 3 sim.	91	44	-47	-52	-0,79
S	200	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	AEV bTq	7	1	-6	-84	-0,09
le jou ngl, olet »	150		AHJ	6	0	-6	-92	-0,10
bre c tat e comp	100 50		BBHI	7	2	-5	-68	-0,08
Non Non	0 19	80 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	7	1	-5	-81	-0,09
ې بې	200	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	AEV bTq	0	0	0	na	na
le jour ngl, nplet »	150		AHJ	0	0	0	na	na
ibre o Etat e	100	[ ]	BBHI	0	0	0	na	na
Non Non Non	0 19	80 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0	0	0	na	na
ş	200	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	AEV bTq	70	31	-39	-55	-0,64
de jour engl, ence »	150		AHJ	75	43	-33	-43	-0,54
nbre État ∉ prése	50		BBHI	76	25	-51	-67	-0,85
Nor *	0 19	80 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	74	33	-41	-55	-0,68

Tableau A 51. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le bas estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Rivière Pentecôte

# Tableau A 52. Évolution de la protection de la côte grâce au développement verticale du pied de glace de haut estran et du développement de la glace sur le bas estran sur le site de Rivière Pentecôte

Protectio développ le haut es si	on de la côte, grâce au pement de la glace sur stran (verticalement) et ur le bas estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
rrs côte	200	AEV bTq	84	29	-55	-65	-0,91
de jou h à la ( é » ou plet »	150	AHJ	65	28	-36	-56	-0,61
mbre ection é éleve	50	BBHI	79	19	-60	-75	-1
prot	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	76	26	-50	-65	-0,84









oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



# **Rivière Saint-Jean**

#### Passé récent

Selon les résultats des relations empiriques, la saison glacielle au cours du passé récent débutait en moyenne, sur le haut estran le 22 décembre et sur le bas estran le 21 décembre (tableau A 53). Elle prenait fin, en moyenne le 4 avril et le 3 avril respectivement. Au total, la saison glacielle durait en moyenne 103 jours sur le haut estran et le bas estran (tableau A 54 et tableau A 55). Même si la saison glacielle, telle que simulée à l'aide des relations empiriques, est d'une durée similaire sur le haut et le bas estran, les conditions d'englacement sont très différentes. Sur le haut estran, le pied de glace atteint un stade de développement « complet » durant 78 jours alors que c'est seulement 22 jours sur le bas estran. Ceci concorde avec les observations réalisées entre 2008 et 2015 où l'on a observé que le développement du pied de glace de bas estran est extrêmement limité. Selon ces résultats, les entités glacielles de haut estran et de bas estran assurent une protection à la côte contre les agents hydrodynamique durant un total de 106 jours (tableau A 56).

### Horizon 2055

Les conditions d'englacement produites à l'aide des relations empiriques pour les trois simulations indiquent que la saison glacielle diminuera de 30 jours sur le haut estran et de 35 jours sur le bas estran (tableau A54 et tableau A 55). Le nombre de jours où la glace protège la côte contre les assauts des agents hydrodynamique diminue de 42 jours pour s'établir à 64 jours (tableau A 56).



#### Tableau A 53. Évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le site de Rivière Saint-Jean

	На	ut estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ა <b>ნ</b>	200		AEV bTq	99	71	-28	-28	-0,47
le jour <b>aciel</b>	150		AHJ	111	90	-21	-19	-0,34
ibre d on gl	100		BBHI	98	56	-42	-43	-0,7
Norr <b>Sais</b>	0 19	80 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	103	73	-30	-30	-0,50
S	200		AEV bTq	87	61	-26	-30	-0,43
te jou ngl, blet »	150		AHJ	89	73	-16	-18	-0,26
mbre c État e comp	100 50		BBHI	60	6	-54	-89	-0,9
Nor «	0 19	80 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	78	47	-32	-46	-0,53
S A	200		AEV bTq	3,63	0,67	-2,96	-82	-0,05
le jou <b>ngl,</b> plet <sub>»</sub>	150		AHJ	7,47	1,00	-6,47	-87	-0,11
nbre c État e ncom	100		BBHI	12,73	2,27	-10,46	-82	-0,17
Non Non i *	0	80 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	7,94	1,31	-7	-84	-0,11
S	200		AEV bTq	9	9	1	8	0,01
le jou <b>ngl,</b> nce »	150		AHJ	15	16	1	9	0,02
nbre c État e orése	100		BBHI	25	47	22	88	0,37
Non Ser F	0	80 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	16	24	8	35	0,13

Tableau A 54. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le haut estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Rivière Saint-Jean

	Bas e	stran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ي <b>ع</b>	200		AEV bTq	96	65	-32	-33	-0,53
de jour <b>Jaciel</b>	150		AHJ	106	82	-24	-23	-0,40
nbre ( son g	50		BBHI	106	58	-49	-46	-0,81
Nor <b>Sai</b> s	0	2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	103	68	-35	-34	-0,58
ស	200		AEV bTq	29	2	-27	-93	-0,45
de jou <b>engl,</b> plet »	150		AHJ	23	4	-19	-82	-0,31
nbre ( État e com∣	50		BBHI	13	1	-12	-94	-0,21
Nor «	0	2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	22	2	-19	-90	-0,32
<u>ନ</u>	200		AEV bTq	0	0	0	na	na
de jou <b>ngl,</b> ∎ <b>plet</b> ⇒	150		AHJ	0	0	0	na	na
nbre ( État e ncorr	50		BBHI	0	0	0	na	na
« Nor	0	2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0	0	0	na	na
ş	200		AEV bTq	64	58	-6	-10	-0,1
de jour engl, ence »	150		AHJ	77	71	-7	-9	-0,11
mbre ( État e prése	50		BBHI	87	50	-36	-42	-0,6
« Noi	0	2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	76	60	-16	-20	-0,27

Tableau A 55. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le bas estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Rivière Saint-Jean

Tableau A 56 Évolution de la protection de la côte grâce au développement verticale du pied de glace de haut estran et du développement de la glace sur le bas estran sur le site de Rivière Saint-Jean

Protectio développ le haut es su	n de la côte, grâce au ement de la glace sur tran (verticalement) et r le bas estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ırs côte	200	AEV bTq	102	72	-30	-30	-0,51
de jou n à la c é » ou iplet »	150	AHJ	109	88	-21	-19	-0,35
ectior éctior ééleve	50	BBHI	108	33	-75	-69	-1,25
prot.	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	106	64	-42	-39	-0,70







oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep







oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



## Longue-Pointe-de-Mingan

#### Passé récent

Au cours du passé récent, les résultats des simulations et relations empiriques indiquent que la saison glacielle débutait entre le 23 et le 27 décembre décembre sur le haut estran et prenait fin entre le 5 avril et le 23 avril (tableaux A 57, A 58 et A 59). Sur le bas estran, la saison glacielle débutait entre le 28 décembre et le 4 janvier et prenait fin entre le 17 mars et le 23 mars. La durée de la saison glacielle était de 99 jours à 120 jours en moyenne sur le haut estran (tableaux A 60, A 61 et A 62) et de 72 jours à 85 jours en moyenne sur le bas estran (tableaux A 63, A 64 et A 65). Au total, la glace assurait 82 jours à 92 jours en moyenne de protection contre l'érosion latérale attribuable aux agents hydrodynamiques (tableaux A 66, A 67 et A 68).

La variabilité chronologique du début de la saison d'englacement entre les trois segments d'analyse de Longue-Pointe-de-Mingan varie notamment en fonction des conditions géomorphologiques sur le haut et le bas estran. Par contre, comme les relations empiriques de Longue-Pointe-de-Mingan ont été construites sur un nombre limité d'observations, les résultats ne peuvent être comparés et associés aux conditions géomorphologiques.

#### Horizon 2055

Pour la période 2041-2070, on prévoit que la saison glacielle débutera sur le haut estran de 15 à 17 jours plus tard en moyenne, soit entre le 7 janvier et le 13 janvier (tableaux A 57, A 58 et A 59). La saison glacielle devrait prendre fin entre 14 et 20 jours plus tôt en moyenne, soit entre le 23 mars et le 6 avril. En conséquence, la durée de la saison glacielle subira une diminution de l'ordre de 27 % à 31 % pour s'établir entre 68 et 85 jours (tableaux A 60, A 61 et A 62). Sur le bas estran, la saison débutera entre 13 et 14 jours plus tard, soit entre le 11 janvier et le 17 janvier (tableaux A 57, A 58 et A 59). La saison glacielle devrait prendre fin entre 20 et 28 jours plus tôt en moyenne, soit entre le 17 février et le 3 mars. En conséquence, la durée de la saison glacielle subira une diminution de l'ordre de 48 % à 63 % pour s'établir entre 26 et 41 jours (tableaux A 63, A 64 et A 65). Au total, la glace assurera entre 34 jours et 50 jours en moyenne de protection contre l'érosion latérale attribuable aux agents hydrodynamiques (tableaux A 66, A 67 et A 68). Il s'agit d'une diminution de l'ordre de 40 % à 59 %.



#### Tableau A 57. Évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le site de Longue-Pointe-de-Mingan B\_Est



#### Tableau A 58. Évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le site de Longue-Pointe-de-Mingan B\_Ouest



## Tableau A 59. Évolution de la chronologie de la saison glacielle sur le site de Longue-Pointe-de-Mingan D

	Haut estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ര <b>ല</b>	200	AEV bTq	108	81	-26	-25	-0,44
de jou <b>Jlaciel</b>	150	AHJ	116	96	-19	-17	-0,32
mbre ( <b>son g</b>	50	BBHI	128	78	-51	-39	-0,85
Noi <b>Sai</b>	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	117	85	-32	-27	-0,54
ន	200	AEV bTq	73	20	-52	-72	-0,87
de jou <b>ingl,</b> plet »	150	AHJ	47	34	-14	-29	-0,23
mbre État e com	50	BBHI	9	1	-8	-89	-0,14
Noi N	0 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	43	18	-25	-63	-0,41
S *	200	AEV bTq	0,23	0,13	-0,10	-43	<0,00
de jou engl, nplet	150	AHJ	0,23	0,10	-0,13	-57	<0,00
nbre État e incon	50	BBHI	0,10	0,00	-0,10	-100	<0,00
Noi *	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0,19	0,08	-0,11	-67	<0,00
<sub>ເ</sub>	200	AEV bTq	35	61	26	74	0,43
de jou engl, ence »	150	AHJ	68	63	-6	-8	-0,09
mbre État ( prés	50	BBHI	119	77	-42	-36	-0,71
Š N	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	74	67	NM	NM	NM

# Tableau A 60. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le haut estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Longue-Pointede-Mingan B\_Est

	Haut estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
് ല	200	AEV bTq	95	65	-30	-31	-0,49
de jou <b>laciel</b>	150	AHJ	106	84	-22	-20	-0,36
nbre c son g	100	BBHI	97	56	-41	-42	-0,68
Nor Sais	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	99	68	-31	-31	-0,51
ស	200	AEV bTq	73	21	-52	-71	-0,87
de jou ingl, olet »	150	AHJ	48	43	-5	-11	-0,08
bre c itat e comp	50	BBHI	13	1	-12	-91	-0,2
NoN ×	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	45	22	-23	-58	-0,38
र <u>ू</u>	200	AEV bTq	0	0	0	na	na
de jou <b>ngl,</b> <b>iplet</b> ⇒	150	AHJ	0	0	0	na	na
nbre o État e ncom	50	BBHI	0	0	0	na	na
Non <b>I</b> *	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0	0	0	na	na
ទ	200	AEV bTq	21	44	23	110	0,38
de jou ngl, nce »	150	AHJ	57	41	-17	-29	-0,28
nbre ( État e orése	50	BBHI	84	55	-29	-34	-0,48
Nom Nom Nom Nom	0	Moy. 3 sim.	54	47	NM	NM	NM

# Tableau A 61. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le haut estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Longue-Pointede-Mingan B\_Ouest

	Haut estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
හ <b>ම</b>	200	AEV bTq	110	82	-29	-26	-0,48
de jou <b>laciel</b>	150	AHJ	121	101	-19	-16	-0,32
nbre ( <b>son g</b>	50	BBHI	130	72	-58	-45	-0,97
Nor <b>Sai</b> :	0	Moy. 3 sim.	120	85	-36	-29	-0,59
ស	200	AEV bTq	18	2	-15	-87	-0,26
de jou ingl, olet »	150	AHJ	11	7	-3	-30	-0,05
ibre c itat e comp	50	ввні	0	0	0	na	na
Non Nor	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	9	3	-6	-59	NM
रु १	200	AEV bTq	0	0	0	na	na
de jou <b>ngl,</b> i <b>plet</b> ⇒	150	AHJ	0	0	0	na	na
nbre o État e ncom	100	BBHI	0	0	0	na	na
Non Non i *	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0	0	0	na	na
ស	200	AEV bTq	65	72	7	11	0,12
de jour <b>engl,</b> ence »	150	AHJ	91	74	-17	-19	-0,28
mbre État prés	50	BBHI	123	63	-60	-49	-1
No ×	0	Moy. 3 sim.	93	70	NM	NM	NM

# Tableau A 62. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le haut estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Longue-Pointede-Mingan D
	Bas estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
ം <b>ല</b>	200	AEV bTq	71	22	-49	-69	-0,82
de jou <b>Iaciel</b>	150	AHJ	70	47	-23	-33	-0,39
mbre ( <b>son g</b>	100	BBHI	88	16	-72	-82	-1,21
Nor <b>Sai</b> :	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	76	28	-48	-61	-0,81
ស	200	AEV bTq	0	0	0	na	na
de jou ingl, olet »	150	AHJ	0	0	0	na	na
nbre ( État e com	50	BBHI	0	0	0	na	na
NoN No	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0	0	0	na	na
र र	200	AEV bTq	0	0	0	na	na
de jou <b>ngl,</b> iplet :	150	AHJ	0	0	0	na	na
nbre o État e ncom	100	BBHI	0	0	0	na	na
Nor Nor	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0	0	0	na	na
ទ	200	AEV bTq	66	16	-50	-76	-0,83
de jou engl, ence »	150	AHJ	60	34	-26	-43	-0,43
nbre ( État e prése	50	BBHI	82	12	-70	-85	-1,16
Nor *	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	69	21	-49	-68	-0,81

Tableau A 63. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le bas estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Longue-Pointede-Mingan B\_Est

	Bas estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
വ ല	200	AEV bTq	79	34	-45	-57	-0,75
de jou <b>laciel</b>	150	AHJ	80	58	-22	-28	-0,37
nbre c son g	100	BBHI	96	31	-65	-68	-1,09
Nor Sais	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	85	41	-44	-51	-0,74
ស	200	AEV bTq	1	0	-1	-100	-0,02
de jou ingl, olet »	150	AHJ	1	0	-1	-100	-0,01
nbre ( État e com	50	BBHI	0	0	0	na	na
NoN ×	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	1	0	-1	-100	-0,01
ខ	200	AEV bTq	0	0	0	na	na
de jou ingl, iplet	150	AHJ	0	0	0	na	na
nbre o État e ncom	100	BBHI	0	0	0	na	na
Nor Nor	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0	0	0	na	na
ទ	200	AEV bTq	74	29	-45	-61	-0,76
te jou <b>ngl,</b> nce "	150	AHJ	74	49	-25	-34	-0,42
nbre c État e orése	100	BBHI	90	26	-64	-71	-1,07
Non Non Non	0 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	80	35	-45	-55	-0,75

## Tableau A 64. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le bas estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Longue-Pointede-Mingan B\_Ouest

	Bas	estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
rs <b>le</b>	200	· · · · ]	AEV bTq	69	20	-49	-71	-0,82
de jou <b>Jlacie</b> l	150		AHJ	67	45	-22	-33	-0,37
nbre ( <b>son g</b>	50		BBHI	81	13	-68	-84	-1,14
Nor <b>Sai</b>	0 1980	2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	72	26	-46	-63	-0,78
S	200		AEV bTq	1	0	-1	-100	-0,02
de jou ingl, olet »	150		AHJ	1	0	-1	-100	-0,01
nbre ( État e comi	50		BBHI	1	0	-1	-100	-0,01
Nor _ *	0	0 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	1	0	-1	-100	-0,01
<u>ନ</u> ୍	200		AEV bTq	0	0	0	na	na
de jou <b>ngl,</b> <b>iplet</b> ⇒	150		AHJ	0	0	0	na	na
∩bre o État e ncom	50		ввні	0	0	0	na	na
Nor	0	2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	0	0	0	na	na
s .	200		AEV bTq	66	17	-49	-74	-0,82
de jou i <b>ngl,</b> nce »	150		AHJ	61	37	-24	-39	-0,4
nbre c État e orése	100		ввні	78	11	-67	-86	-1,12
Non Non Non	0	2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	68	22	-47	-66	-0,78

## Tableau A 65. Évolution de la saison glacielle et de l'état d'englacement sur le bas estran pour le passé récent et l'horizon 2055 sur le site de Longue-Pointede-Mingan D

Tableau A 66. Évolution de la protection de la côte grâce au développement verticale du pied de glace de haut estran et du développement de la glace sur le bas estran sur le site de Longue-Pointe-de-Mingan B\_Est

Prote dével le hau	ction de la côte, grâce au oppement de la glace sur t estran (verticalement) et sur le bas estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
s de <b>Ia</b>	200	AEV bTq	103	47	-56	-54	-0,93
e jours on de te	150	AHJ	93	80	-13	-14	-0,22
nbre d otecti cô	50	BBHI	79	15	-64	-81	-1,07
non pre	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	92	47	-44	-50	-0,74

Tableau A 67 Évolution de la protection de la côte grâce au développement verticale du pied de glace de haut estran et du développement de la glace sur le bas estran sur le site de Longue-Pointe-de-Mingan B\_Ouest

Prote dével le hau	ction de la côte, grâce au oppement de la glace sur t estran (verticalement) et sur le bas estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
s de <b>la</b>	200	AEV bTq	90	49	-41	-45	-0,68
e jours on de te	150	AHJ	91	71	-20	-22	-0,33
nbre d otectio cô	50	BBHI	67	31	-36	-54	-0,6
Nor <b>pr</b> e	0	Moy. 3 sim.	82	50	-32	-40	-0,54

Tableau A 68. Évolution de la protection de la côte grâce au développement verticale du pied de glace de haut estran et du développement de la glace sur le bas estran sur le site de Longue-Pointe-de-Mingan D

Protectio développ le haut es si	on de la côte, grâce au pement de la glace sur stran (verticalement) et ur le bas estran	Simulations	Passé récent	Horizon 2055	Delta	Évolution (%)	Taux (j/an)
rs côte	200	AEV bTq	88	34	-54	-62	-0,91
de jou h à la c é » ou plet »	150	AHJ	79	59	-20	-25	-0,33
ection éction éleve	50	BBHI	87	9	-78	-90	-1,3
prot	0 1980 2010 2040 2070	Moy. 3 sim.	85	34	-51	-59	-0,85



oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep





oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep





2070 - 0 1 2 2050 - 0 1 2 2040 - 2030 - 2020 - 2010

Dev. vertical HE bbhi

oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep





oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep

Figure A 27. Évolution de la concentration et du développement vertical de la glace sur le haut estran (figures du haut, HE) et sur le bas estran (figures du bas, BE) selon la simulation la plus chaude (BBHI), Longue-Pointe-de-Mingan B\_ouest



oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep





oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep



oct nov dec jan fev mar avr mai jun jul aou sep

Figure A 28. Évolution de la concentration et du développement vertical de la glace sur le haut estran (figures du haut, HE) et sur le bas estran (figures du bas, BE) selon la simulation la plus chaude (BBHI), Longue-Pointe-de-Mingan D

**ANNEXE J** Conditions de vagues pour le passé récent et l'horizon 2055 Pour chacun des sites témoins, deux figures ont été produites pour illustrer l'évolution des conditions de vagues entre le passé récent et l'horizon 2055 (simulation BBHI, la plus chaude + WaveWatch III). La première illustre le nombre d'heures par an (1er juillet au 30 juin) où la hauteur significative des vagues orientées vers la côte est supérieure au 95<sup>e</sup> percentile (calculé sur le passé récent), et ce, de manière saisonnière. (ex. figure A 29). La seconde illustre l'évolution de la hauteur significative (Hs) maximale atteinte annuellement pour les vagues en direction de la côte à gauche (figure A 30). Du côté droit, il s'agit de l'évolution de la valeur du niveau d'eau maximum atteint annuellement. L'évolution du niveau marin relatif n'est toutefois pas quantifiée ni incluse dans le cadre de ce projet.

#### Saint-Ulric



Figure A 29. Évolution du nombre d'heure où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (1,08 m) entre le passé récent et l'horizon 2055 (vagues en direction de la côte), Saint-Ulric



Figure A 30. Évolution de la hauteur significative maximale atteinte annuellement (gauche) et du niveau d'eau (WLEV) (droite) (vagues en direction de la côte), Saint-Ulric

#### Rivière-à-Claude



Figure A 31. Évolution du nombre d'heure où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95<sup>e</sup> percentile (1,35 m) entre le passé récent et l'horizon 2055 (vagues en direction de la côte), Rivière-à-Claude



Figure A 32. Évolution de la hauteur significative maximale atteinte annuellement (gauche) et du niveau d'eau (WLEV) (droite) (vagues en direction de la côte), Rivière-à-Claude

### Penouille 1-3



Figure A 33. Évolution du nombre d'heure où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95<sup>e</sup> percentile (0,74 m) entre le passé récent et l'horizon 2055 (vagues en direction de la côte), Penouille 1-3



Figure A 34. Évolution de la hauteur significative maximale atteinte annuellement (gauche) et du niveau d'eau (WLEV) (droite) (vagues en direction de la côte), Penouille 1-3

#### Penouille 4-5



Figure A 35. Évolution du nombre d'heure où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (0,74 m) entre le passé récent et l'horizon 2055 (vagues en direction de la côte), Penouille 4-5



Figure A 36. Évolution de la hauteur significative maximale atteinte annuellement (gauche) et du niveau d'eau (WLEV) (droite) (vagues en direction de la côte), Penouille 4-5

#### Chandler



Figure A 37. Évolution du nombre d'heure où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (1,35 m) entre le passé récent et l'horizon 2055 (vagues en direction de la côte), Chandler



Figure A 38. Évolution de la hauteur significative maximale atteinte annuellement (gauche) et du niveau d'eau (WLEV) (droite) (vagues en direction de la côte), Chandler





Figure A 39. Évolution du nombre d'heure où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95<sup>e</sup> percentile (0,89 m) entre le passé récent et l'horizon 2055 (vagues en direction de la côte), Maria et Pointe-Verte



Figure A 40. Évolution de la hauteur significative maximale atteinte annuellement (gauche) et du niveau d'eau (WLEV) (droite) (vagues en direction de la côte), Maria et Pointe-Verte

### La Martinique



Figure A 41. Évolution du nombre d'heure où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95<sup>e</sup> percentile (3,52 m) entre le passé récent et l'horizon 2055 (vagues en direction de la côte), La Martinique



Figure A 42. Évolution de la hauteur significative maximale atteinte annuellement (gauche) et du niveau d'eau (WLEV) (droite) (vagues en direction de la côte), La Martinique

#### Pointe-aux-Loups



Figure A 43. Évolution du nombre d'heure où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (3,38 m) entre le passé récent et l'horizon 2055 (vagues en direction de la côte), Pointe-aux-Loups



Figure A 44. Évolution de la hauteur significative maximale atteinte annuellement (gauche) et du niveau d'eau (WLEV) (droite) (vagues en direction de la côte), Pointe-aux-Loups

#### Pointe-Lebel



Figure A 45. Évolution du nombre d'heure où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (0,84 m) entre le passé récent et l'horizon 2055 (vagues en direction de la côte), Pointe-Lebel



Figure A 46. Évolution de la hauteur significative maximale atteinte annuellement (gauche) et du niveau d'eau (WLEV) (droite) (vagues en direction de la côte), Pointe-Lebel

#### Baie-Saint-Ludger



Figure A 47. Évolution du nombre d'heure où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (0,74 m) entre le passé récent et l'horizon 2055 (vagues en direction de la côte), Baie-Saint-Ludger



Figure A 48. Évolution de la hauteur significative maximale atteinte annuellement (gauche) et du niveau d'eau (WLEV) (droite) (vagues en direction de la côte), Baie-Saint-Ludger

### Rivière Pentecôte



Figure A 49. Évolution du nombre d'heure où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (3,38 m) entre le passé récent et l'horizon 2055 (vagues en direction de la côte), Rivière Pentecôte



Figure A 50. Évolution de la hauteur significative maximale atteinte annuellement (gauche) et du niveau d'eau (WLEV) (droite) (vagues en direction de la côte), Rivière Pentecôte

#### Rivière Saint-Jean



Figure A 51. Évolution du nombre d'heure où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95<sup>e</sup> percentile (0,744 m) entre le passé récent et l'horizon 2055 (vagues en direction de la côte), Rivière Saint-Jean



Figure A 52. Évolution de la hauteur significative maximale atteinte annuellement (gauche) et du niveau d'eau (WLEV) (droite) (vagues en direction de la côte), Rivière Saint-Jean





Figure A 53. Évolution du nombre d'heure où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (0,744 m) entre le passé récent et l'horizon 2055 (vagues en direction de la côte), Longue-Pointe-de-Mingan B\_est



Figure A 54. Évolution de la hauteur significative maximale atteinte annuellement (gauche) et du niveau d'eau (WLEV) (droite) (vagues en direction de la côte), Longue-Pointe-de-Mingan B\_est



Figure A 55. Évolution du nombre d'heure où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95<sup>e</sup> percentile (1,52 m) entre le passé récent et l'horizon 2055 (vagues en direction de la côte), Longue-Pointe-de-Mingan B\_ouest<sup>12</sup>





<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Les données de vagues de Longue-Pointe-de-Mingan B\_est et B\_ouest proviennent du même point. Par contre, en raison d'une légère différence d'orientation de la côte, les résultats sont légèrement différents.



Figure A 57. Évolution du nombre d'heure où la hauteur significative des vagues (Hs) est supérieure au 95e percentile (0,744 m) entre le passé récent et l'horizon 2055 (vagues en direction de la côte), Longue-Pointe-de-Mingan D



Figure A 58. Évolution de la hauteur significative maximale atteinte annuellement (gauche) et du niveau d'eau (WLEV) (droite) (vagues en direction de la côte), Longue-Pointe-de-Mingan D

ANNEXE K Tableau détaillé des données des marégraphes les plus près des sites témoin

### Saint-Ulric

## Tableau A 69. Données de marnage de la station marégraphique de Matane (2955)

Localité	Matane (2955)			
Type de marée	semi-diurne			
Niveau moyen de l'eau	2,0 m			
Marnage				
Marée moyenne	2,8 m			
Grande marée	4,0 m			
Pleine mer supérieure				
Marée moyenne	3,4 m			
Grande marée	4,1 m			
Basse mer inférieure				
Marée moyenne	0,6 m			
Grande marée	0,1 m			
Extrêmes				
Pleine mer	nd			
Basse mer	nd			

### Rivière-à-Claude

# Tableau A 70. Données de marnage de la station marégraphique de Mont-Louis (2920)

Localité	Mont-Louis (2920)			
Type de marée	semi-diurne			
Niveau moyen de l'eau	1,5 m			
Marnage				
Marée moyenne	2,1 m			
Grande marée	3,0 m			
Pleine mer supérieure				
Marée moyenne	2,7 m			
Grande marée	3,3 m			
Basse mer inférieure				
Marée moyenne	0,6 m			
Grande marée	0,2 m			
Extrêmes				
Pleine mer	nd			
Basse mer	nd			

## Penouille1-3 et Penouille 4-5

#### Tableau A 71. Données de marnage de la station marégraphique de Gaspé (2320)

Localité	Gaspé (2320)			
Type de marée	Mixte semi-diurne			
Niveau moyen de l'eau	1,0 m			
Marnage				
Marée moyenne	1,2 m			
Grande marée	1,7 m			
Pleine mer supérieure				
Marée moyenne	1,6 m			
Grande marée	2,0 m			
Basse mer inférieure				
Marée moyenne	0,4 m			
Grande marée	0,3 m			
Extrêmes				
Pleine mer	nd			
Basse mer	nd			

### Chandler

## Tableau A 72. Données de marnage de la station marégraphique de Grande Rivière (2279)

Localité	Grande Rivière (2279)
Type de marée	Mixte semi-diurne
Niveau moyen de l'eau	0,8 m
Marnage	
Marée moyenne	1,1 m
Grande marée	1,8 m
Pleine mer supérieure	
Marée moyenne	1,4 m
Grande marée	1,8 m
Basse mer inférieure	
Marée moyenne	0,3 m
Grande marée	0,0 m
Extrêmes	
Pleine mer	nd
Basse mer	nd

#### Maria et Pointe-Verte

## Tableau A 73. Données de marnage de la station marégraphique de Black Cape (2215)

Localité	Black Cape (2215)			
Type de marée	Mixte semi-diurne			
Niveau moyen de l'eau	1,2 m			
Marnage				
Marée moyenne	1,7 m			
Grande marée	2,5 m			
Pleine mer supérieure				
Marée moyenne	2,1 m			
Grande marée	2,6 m			
Basse mer inférieure				
Marée moyenne	0,4 m			
Grande marée	0,1 m			
Extrêmes				
Pleine mer	nd			
Basse mer	nd			

### La Martinique et Pointe-aux-Loups

# Tableau A 74. Données de marnage de la station marégraphique de Cap-aux-Meules (1970)

Localité	Cap-aux-Meules (1970)
Type de marée	Mixte semi-diurne
Niveau moyen de l'eau	0,7 m
Marnage	
Marée moyenne	0,6 m
Grande marée	1,1 m
Pleine mer supérieure	
Marée moyenne	1,2 m
Grande marée	1,2 m
Basse mer inférieure	
Marée moyenne	0,5 m
Grande marée	0,3 m
Extrêmes	
Pleine mer	2,4 m
Basse mer	-0,5 m

### Pointe-Lebel et Baie-Saint-Ludger

## Tableau A 75. Données de marnage de la station marégraphique de Baie-Comeau (2840)

Localité	Baie-Comeau (2840)	
Type de marée	semi-diurne	
Niveau moyen de l'eau	1,8 m	
Marnage		
Marée moyenne	3,0 m	
Grande marée	4,3 m	
Pleine mer supérieure		
Marée moyenne	3,4 m	
Grande marée	4,2 m	
Basse mer inférieure		
Marée moyenne	0,5 m	
Grande marée	- 0,1 m	
Extrêmes		
Pleine mer	4,9 m	
Basse mer	- 0,9 m	

### Rivière Pentecôte

# Tableau A 76. Données de marnage de la station marégraphique de Port-Cartier (2790)

Localité	Port-Cartier (2790)	
Type de marée	Mixte semi-diurne	
Niveau moyen de l'eau	1,5 m	
Marnage		
Marée moyenne	2,4 m	
Grande marée	3,5 m	
Pleine mer supérieure		
Marée moyenne	2,8 m	
Grande marée	3,5 m	
Basse mer inférieure		
Marée moyenne	0,4 m	
Grande marée	0,0 m	
Extrêmes		
Pleine mer	nd	
Basse mer	nd	

### Rivière Saint-Jean et Longue-Pointe-de-Mingan

## Tableau A 77. Données de marnage de la station marégraphique de Mingan (2470)

Localité	Mingan (2470)	
Type de marée	Mixte semi-diurne	
Niveau moyen de l'eau	1,1 m	
Marnage		
Marée moyenne	1,7 m	
Grande marée	2,5 m	
Pleine mer supérieure		
Marée moyenne	2,1 m	
Grande marée	2,6 m	
Basse mer inférieure		
Marée moyenne	0,4 m	
Grande marée	0,1 m	
Extrêmes		
Pleine mer	nd	
Basse mer	nd	

ANNEXE L Formule pour extraire automatiquement l'orientation de la côte à partir du tracé d'une ligne dans ArcGIS Formule python pour obtenir l'orientation automatique de la côte à l'aide d'une ligne dans ArcGIS

Pour le point A (point de départ dans le sens de la dérive littorale) :

360 + math.degrees(math.atan2((!Shape.firstpoint.X! -!Shape.lastpoint.X!),(!Shape.firstpoint.Y! - !Shape.lastpoint.Y!))) if math.degrees(math.atan2((!Shape.firstpoint.X! -!Shape.lastpoint.X!),(!Shape.firstpoint.Y! - !Shape.lastpoint.Y!))) < 0 else math.degrees(math.atan2((!Shape.firstpoint.X! -!Shape.lastpoint.X!),(!Shape.firstpoint.Y! - !Shape.lastpoint.Y!)))

Pour le point B (point d'arrivée dans le sens de la dérive littorale) :

360 + math.degrees(math.atan2((!Shape.lastpoint.X! -!Shape.firstpoint.X!),(!Shape.lastpoint.Y! - !Shape.firstpoint.Y!))) if math.degrees(math.atan2((!Shape.lastpoint.X! -!Shape.firstpoint.X!),(!Shape.lastpoint.Y! - !Shape.firstpoint.Y!))) < 0 else math.degrees(math.atan2((!Shape.lastpoint.X! -!Shape.firstpoint.X!),(!Shape.lastpoint.Y! - !Shape.firstpoint.Y!)))
ANNEXE M Conditions de vagues observées à Penouille 1-3 et Penouille 4-5

## Conditions de vagues pour Penouille 1-3 et 4-5

Les conditions de **vagues** les plus énergétiques ne se produisent pas toujours au même moment sur les deux segments d'analyse de Penouille, et ce, en fonction de la provenance des vagues (direction) par rapport à l'orientation du littoral. À titre d'exemple, les images prises durant la tempête du 6 décembre 2010 montrent que le niveau d'eau est extrêmement élevé, mais qu'il n'y a pratiquement pas de vagues le long du littoral qui fait face à l'ouest (Penouille 4-5). Pendant ce temps, sur le littoral qui fait face au sud (Penouille 1-3), les vagues ont provoqué un recul significatif de la ligne de rivage (figure A 59, a et b). Inversement, les conditions hydrodynamiques ont été plus énergétiques sur le littoral de Penouille 4-5, par exemple, le 15 juin 2010 (figure A 59, c et d).



Figure A 59. Conditions de vagues différentes entre les deux segments d'analyse de Penouille (Penouille 1-3 et Penouille 4-5)